

Bakalářská práce

**Spojování konvenčně nesvařitelných materiálů**  
**Joining of conventionally unweldable materials**

Jméno autora: Łukasz Kantor

Rok odevzdání: 2021

## Abstrakt

Teoretická část bakalářské práce se zabývá vybranými nekonvenčními metodami svařování. Mezi tyto metody v rámci práce řadíme laserové svařování, plazmové svařování a výbuchové svařování. V rámci svařitelnosti materiálu těmito metodami je řešena problematika svařování titanu s ocelí, které nelze běžnými metodami svařit tak, aby byla zachována vysoká kvalita svarového spoje. Praktická část bakalářské práce se zabývá analýzou výbuchem svařovaného materiálu oceli 18/10 s titanem komerční čistoty (CP Ti). Byla provedena metalografická analýza vzorků, v rámci kterých, byla zkoumána např. velikost zrn nebo parametry vlny svarového spoje. Byla také měřena mikrotvrdost podle Vickerse a pomocí SEM byly analyzovány fáze ve svarové oblasti.

**Klíčová slova:** nekonvenční metody svařování, svařování výbuchem, titan komerční čistoty, ocel 18/10

## Abstract

The theoretical part of the bachelor thesis deals with selected unconventional welding methods. These methods include laser welding, plasma welding and explosion welding. Within the weldability of the material with these methods the problem of welding titanium with steel is solved, which cannot be welded by conventional methods to maintain the high quality of the welded joint. The practical part of the bachelor thesis deals with the analysis of the explosion welded material steel 18/10 with titanium of commercial purity (CP Ti). Metallographic analysis of the samples was performed, in which, for example, the grain size or the parameters of the weld wave were examined. Vickers microhardness was also measured and the phases in the weld area were analysed by SEM.

**Key words:** unconventional welding methods, explosion welding, commercial purity titanium, 18/10 steel

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce prof. Ing. Evě Mazancové, CSc. za odborné rady a vstřícný přístup během psaní práce.

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část .....</b>	<b>7</b>
2.1	Laserové svařování .....	7
2.1.1	LASER.....	7
2.1.2	Laserové svařování .....	10
2.1.3	Povrchové laserové svařování (pulzní svařování) .....	10
2.1.4	Kontinuální laserové svařování (metoda klíčové dírky).....	11
2.1.5	Aplikace laserového svařování .....	12
2.2	Plazmové svařování .....	14
2.2.1	Plazma .....	14
2.2.2	Plazmové svařování .....	15
2.2.3	Plazmové hořáky .....	17
2.2.4	Aplikace plazmového svařování.....	18
2.3	Svařování výbuchem.....	19
2.3.1	Výbušniny používané při svařování výbuchem a výbuchové přeměny .....	20
2.3.2	Princip svařování výbuchem .....	22
2.3.3	Svařitelnost materiálů výbuchem .....	25
2.3.4	Mechanismus formování vln při výbuchovém svařování.....	26
2.4	Titan .....	28
2.4.1	CP Ti.....	28
2.5	Antikorozní oceli .....	30
2.5.1	Antikorozní ocel 18/10 .....	31
2.6	Svařitelnost titanu s antikorozní ocelí.....	32
<b>3</b>	<b>Praktická část .....</b>	<b>34</b>
3.1	Vybrané metalografické parametry výbuchem svařované oceli 18/10 s CP Ti.....	35
3.1.1	Příprava vzorků pro experimentální část .....	35

3.1.2	Analýza mikrostruktury antikorozi oceli 18/10.....	35
3.1.3	Analýza mikrostruktury komerčně čistého titanu.....	37
3.1.4	Měření tloušťky nakupeného materiálu u interfáze.....	39
3.1.5	Analýza vlny svarového spoje.....	40
3.1.6	Analýza fází pomocí SEM (řádkovací elektronová mikroskopie) .....	42
3.1.7	Vyhodnocování směsných oblastí pomocí SEM.....	45
3.1.8	Měření mikrotvrdosti podle Vickerse.....	51
<b>4</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>55</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>56</b>

## 1 Úvod

Spojování materiálů nekonvenčními metodami je realizováno u takových materiálů, které jsou běžnými metodami nespojitelné, nebo je vzniklý spoj nekvalitní. Nekonvenčními metodami se spojují materiály, které vykazují různé vlastnosti svařitelnosti a vlastnosti fyzikální nebo chemické. Běžné metody svařování jsou pro spojování dvou materiálů různých povah nevhodné z několika důvodů. Materiály mohou mít různou teplotu tavení, což ovlivňuje průběh tvorby spoje, mohou oxidovat nebo může v oblasti dojít k tvorbě křehkých fází, které mohou svarový spoj znehodnotit. Příkladem takovýchto dvou materiálů, které běžnými metodami nelze spojit, může být ocel a titan. Mezi nekonvenční metody svařování lze zařadit např. svařování laserem, svařování plazmou a svařování výbuchem. Tyto metody se řadí mezi moderní a perspektivní metody svařování.

Bimetal na bázi oceli a titanu se řadí mezi velmi perspektivní materiály. Oba z těchto materiálů vynikají svými specifickými vlastnostmi a jejich kombinací lze vytvořit materiál, kterého aplikace může předčít oba základní materiály.

Cílem práce bylo vysvětlit a srovnat nekonvenční metody svařování, poukázat na problematiku svařování oceli s titanem a vyhodnotit nejlepší metodu pro spojení těchto materiálů.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Laserové svařování

#### 2.1.1 LASER

Laser (Light amplification by stimulated emission of radiation) je zařízení, které je schopno převést energii nižší kvality na energii vyšší kvality – koherentní záření, ať už se jedná o energii chemickou, tepelnou, elektrickou a jiné. Z termomechanického hlediska lze říct, že laser je schopen snížit entropii dané soustavy při spotřebě energie.

Laser se skládá ze 3 základních částí:

- laserové aktivní prostředí – zde dochází k zesilování záření
- zdroj čerpání – zde probíhá excitace aktivního prostředí
- rezonátor – vytváří zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím, to vede k vytvoření laserových oscilací

Princip fungování laseru bude popsán pomocí zjednodušeného případu „tří hladinového“ atomu, kde  $E_0$  představuje základní energetický stav atomu,  $E_1$  je metastabilní stav,  $E_2$  symbolizuje excitovaný stav, který se nachází mezi  $E_0$  a  $E_2$ .

Atom nemůže přejít ze stavu  $E_0$  do  $E_1$ , tento přechod je zakázaný výběrovými pravidly. Atom může být excitován do stavu  $E_2$ , ze kterého může následně samovolně přejít do základního stavu  $E_1$ . Aby bylo možné atom excitovat, je zapotřebí záření o frekvenci  $\nu$ , které je dáno vztahem:

$$\nu = (E_2 - E_0) \cdot h^{-1} \quad (1)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta ( $6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ )

Během samovolného přechodu se emituje záření o frekvenci dané vztahem:

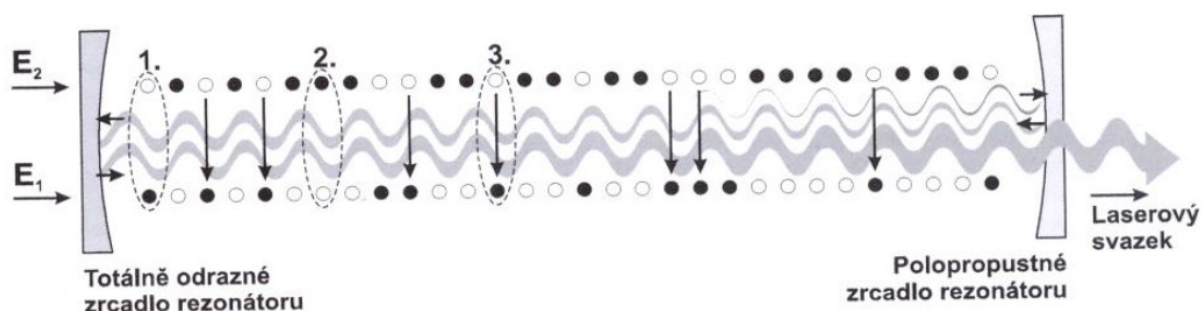
$$\nu = (E_2 - E_1) \cdot h^{-1} \quad (2)$$

kde dojde k naplnění metastabilního energetického stavu  $E_1$ . Přidá-li se do systému záření o kmitočtu:

$$\nu = (E_1 - E_0) \cdot h^{-1} \quad (3)$$

nastane v systému tzv. simulovaná emise, což je přechod z metastabilního stavu  $E_1$  do základního energetického stavu  $E_0$ , během něhož je emitované záření ve fázi s budícím zářením

a dochází ke vzniku zcela koherentního paprsku. Jako zdroj budícího záření lze zařadit elektrickou energii nebo tepelnou energii získanou chemickou reakcí. Excitovaný atom, molekula nebo iont (záleží podle typu laseru) je obsažen v aktivním prostředí. Nejdůležitějším procesem pro správné fungování laseru je proces stimulované emise, který nastává během interakce excitovaného kvantového systému, tedy (atomu nebo molekuly) s elektromagnetickým zářením, tedy fotonem, jehož frekvence  $\nu$ , je přímo úměrně shodná s energetickým rozdílem mezi excitovaným a jedním z níže se nacházejících kvantových systémů. U toho nastává přechod do chudšího stavu kvantového systému a současně dochází k uvolňování excitační energie, a to emitováním fotonů s energií  $h \cdot \nu$ . Emitovaný foton vykazuje totožné vlastnosti, jako vlastnosti fotonu, který zapříčinil stimulaci emise. Toto je základem pro zvýšení intenzity světla [1]. Schématické znázornění principu laseru je uvedeno na Obr. 1.



Obr. 1 – Schéma fungování laseru [1]

- Kde:
1. Výchozí stav
  2. Excitovaný stav kvantové soustavy
  3. Stimulovaná emise a energetická hladina kvantové soustavy  $E_1$  a soustavy  $E_2$

### Rozdělení laserů podle typů

Lasery lze obecně rozlišit podle několika různých parametrů. Mezi ty hlavní patří rozdělení podle aktivního prostředí. Laser lze zkonstruovat z různých typů látek různého skupenství. Dalším parametrem může být rozdělení podle vlnové délky optického záření (rentgenové, ultrafialové, infračervené). Zvláštní kategorií laserů tvoří polovodičové lasery (laserové diody). Lasery se také dělí podle režimu provozu do dvou skupin na kontinuální a impulsní. Níže budou popsány nejdůležitější typy laserů, které se rozdělují, podle již zmíněných parametrů a skupin.



## **Dělení podle aktivního prostředí**

- lasery plynové
- kapalinové
- pevnolátkové
- plazmatické

### **Plynové lasery**

Jedná se o skupinu, která je v dnešní době nejčastěji prakticky využívána. Plynové lasery jsou malých rozměrů a jsou schopny dosáhnout velmi vysokých hodnot výkonu, a to hodnot vyšších než 100 kW. Aktivní prostředí je tvořeno samotným plynem nebo směsí plynů. Nejčastěji používaným plynem je CO<sub>2</sub>, ale využívá se i řada další plynů jako dusík, argon nebo helium v kombinaci s neonem. Vzhledem k velmi vysokému výkonu těchto laserů se více předpokládá jejich využití v budoucnu, protože potřebný výkon laseru k tepelnému zpracování je  $5 \pm 3$  kW. Momentálně se tedy spíše používají jiné typy laseru, které ideálněji splňují výkonnostní podmínky.

### **Lasery v pevné fázi (pevnolátkové)**

Dnešní pevnolátkové lasery nejčastěji používají jako zdroj aktivního prostředí krystaly rubínu. Ty slouží jako zdroj různých délek impulsů záření. V současnosti jsou tyto lasery schopny dosáhnout energie impulsů do hodnot kolem  $10^4$  J, kde tato energie při délce impulsu  $10^{-3}$  odpovídá výkonu laseru  $10^7$  W. Laserům na bázi krystalu jsou podobné lasery, které jako zdroj aktivního prostředí využívají skleněné materiály s cizorodou příměsí, např. příměs neodymu (Nd: YAG laser). Mezi tento typ laserů řadíme tzv. Q-lasery, které jsou používány pro generaci vysokovýkonných impulsů, řádově až do hodnot  $10^{11}$  W. Pevnolátkové lasery jsou velmi stabilní, jejich výhodou je vysoká nenáročnost na údržbu a schopnost pracovat ve všech režimech.

## **Dělení podle režimu provozu**

Dle tohoto kritéria můžeme lasery rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou kontinuální lasery, často označované jako CW lasery. Tyto lasery se vyznačují spojitým vyzařováním. Při tepelném zpracování se používají pro plošný ohřev kovových povrchů. Pro kontinuální provoz nejsou příliš vhodné lasery pevnolátkové. Důvodem je nízká tepelná vodivost a s tím souvisí i

problémy se zabezpečením a ochlazováním aktivního prostředí. Pro potřeby tepelného zpracování je nejideálnějším typem laseru CO<sub>2</sub> kontinuální laser.

Druhou skupinou jsou impulsní lasery, označované také jako pulsní. Díky svému pulsnímu režimu jsou vhodné pro lokálně velmi omezené využití tepelného účinku, např. při vrtání.

### **2.1.2 Laserové svařování**

První laser byl zkonstruován v roce 1960 a nedlouho poté začaly pokusy o svařování materiálu za pomoci této nové technologie. Výkon laseru ze začátku nebyl dostatečně vysoký, ale v roce 1964 byl vyvinut první typ plynového laseru (na bázi CO<sub>2</sub>), jehož výkon byl mnohonásobně vyšší a bylo možné jej použít jak pro svařování, tak pro řezání materiálu. Laserové svařování se v 60. letech provádělo ve výzkumných laboratořích a v průmyslových zařízeních se začalo používat až v 70. letech. Za zmínku stojí první velké využití svařování laserem, které bylo realizováno v roce 1976 firmou General Motors a jednalo se o svařování ventilů automobilových motorů. V posledních letech došlo k velkému posunu v technologii svařování laserem. Důvodem je vývoj stále výkonnějších, modernějších laserů a nových typů laserů. Dalším důvodem je, že se vyvíjí stále nové materiály, které běžnými svařovacími metodami nelze spojit. Výhodou je plnění vysokých nároků na produktivitu, opakovatelnost technologického procesu a v neposlední řadě zaručení vysoké kvality svaru, vysoké hloubky průvaru, velmi malé tepelně ovlivněné zóny, možnost svařování bez přídavného materiálu, poměrně hladký povrch svaru a velmi snadná možnost automatizace (laserová svářecí linka). Dle normy ČSN ISO 4063 je laserové svařování rozděleno podle metod:

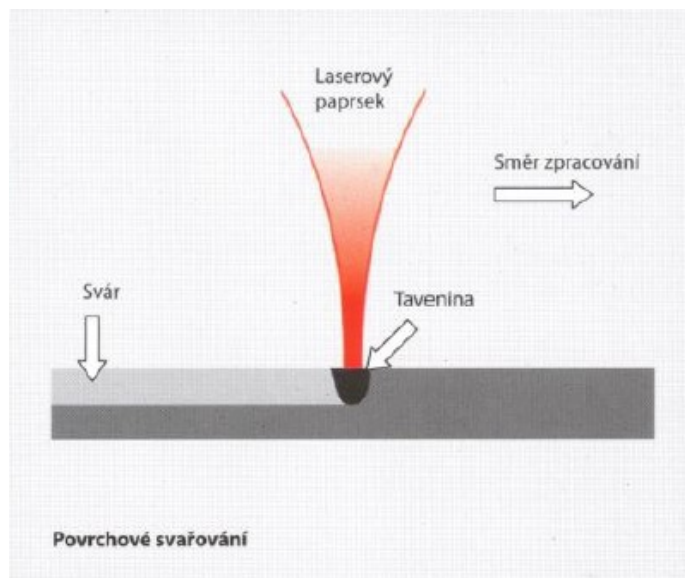
- laserové svařování pevnolátkovými lasery
- laserové svařování diodovými lasery
- laserové svařování plynovými lasery [2-4]

Rozlišujeme dva druhy laserového svařování. Prvním typem je povrchové laserové svařování, jinak zvané pulzní a druhým typem je kontinuální laserové svařování, které je známé také jako metoda klíčové dírky.

### **2.1.3 Povrchové laserové svařování (pulzní svařování)**

Tato metoda funguje na principu vedení tepla. Při této metodě je materiál taven vedením tepla, které vzniká adsorpcí laserového záření – viz Obr. 2. Vzniklé teplo může být vedeno pouze do určité hloubky, a proto je hloubka průvaru u této metody omezena. Značnou výhodou je rychlost povrchového laserového svařování. Jak již napovídá název, metoda je často používána ke

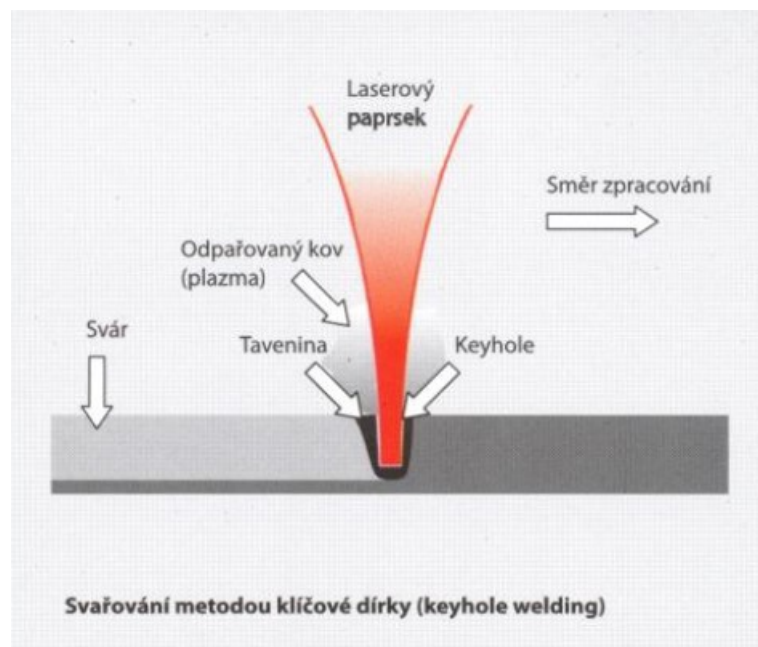
svařování povrchů, kde není zapotřebí docílit hlubokého průvaru. Metoda je také vhodná pro svařování obtížně svařitelných materiálů a výhodou je snadná automatizace [1-3].



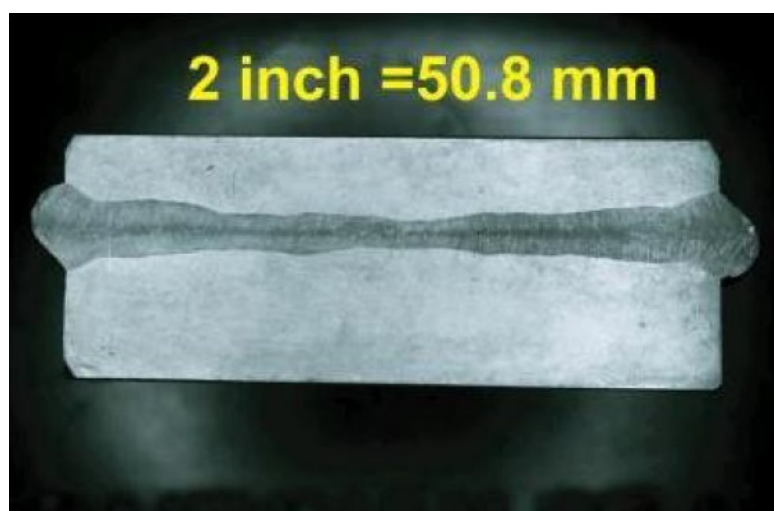
Obr. 2 – Princip povrchové metody laserového svařování [1]

#### 2.1.4 Kontinuální laserové svařování (metoda klíčové dírky)

Metoda vyžaduje vysokou hustotu výkonu laserového paprsku na dopadovou plochu materiálu. Vlivem velmi vysoké teploty dochází v místě dopadu laserového paprsku k tavení a vaření materiálu a dojde k vytvoření par kovů nad materiálem. Působením vysoké energie laserového paprsku s plyny dojde ke vzniku plazmy a následně k hlubokému provařování materiálu. Působením laserového paprsku dojde ke vzniku kapiláry o průměru od 1,5 až do 2 – násobku průměru ohniska laserového svazku. Tlak plynů, které z kapiláry vystupují, zabraňuje jejímu uzavření. Tvar kapiláry je také ovlivněn vzniklou plazmou nad povrchem materiálu. Energie do materiálu vstupuje vedením skrze stěny kapiláry, a to nejprve do taveniny a poté do tuhého materiálu. Takto proniká laserový paprsek hluboko do materiálu, při čemž se vytváří již zmíněná klíčová dírka. Díky tomuto jevu dochází ke zlepšení adsorpce záření v místě dopadu laserového paprsku, což má za následek pevný a úzký svar [1, 2]. Schematické znázornění svařování metodou klíčové dírky je uvedeno na Obr. 3 a snímek svaru realizovaný danou metodou ukazuje Obr. 4.



Obr. 3 – Svařování metodou klíčové dírky [1]



Obr. 4 – Svar provedený metodou klíčové dírky [5]

### 2.1.5 Aplikace laserového svařování

Vzhledem k výše uvedeným vlastnostem a parametrům je laserové svařování v praxi stále více využíváno. V budoucnu se díky stále novějším technologiím bude vylepšovat a více používat. Velkou výhodou pro praktické používání je možnost automatizace procesu, velká produktivita a velmi vysoká kvalita svarů. Další výhodou je možnost svařovat velkou škálu materiálů a materiály konvenčně nesvařitelné (viz. Obr. 3). Mezi nevýhody patří vyšší pořizovací cena, horší možnost mobility a flexibility zařízení a potřeba ideálního ustavení mezi svarovými plochami [4].

Mezi konkrétní aplikace lze zařadit svařování termočlánků. Ty vyžadují nejlépe nulovou četnost poruch. Pro jejich výrobu se používají různé materiály, které často nelze běžnými metodami spojit. Je třeba volit optimální výkon, protože termočlánek nesmí být provařen. Laserové svařování nahradilo technologii pájení díky dosažení lepších výsledných vlastností. Dalším příkladem může být svařování karoserie automobilu Volkswagen Golf. Díky svařování laserem došlo ke zvětšení tuhosti karosérie. Na 5. prototypu karosérii tohoto vozu je laserem vytvořeno 72 metrů svarů [4]. Na Obr. 5 je ukázáno, jaká je svařitelnost různých materiálů v rámci laserového svařování.

	W	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Be	Fe	Pt	Ni	Pd	Cu	Au	Ag	Mg	Al	Zn	Cd	Pb
Sn	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	5	4	4	5	5	5	5	4
Pb	5		5	5	5	5		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Cd				5	5	5		5	4	4	4	5	4	3	2	5	5		
Zn	5		5	5	4	5	5	4	5	4	4	3	4	3	5	4			
Al	5	5	5	5	4	4	5	4	5	4	5	4	4	4	4				
Mg	5		5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4					
Ag	5	5	5	5	5	4	5	5	4	5	2	4	2						
Au			5	4	5	4	4	4	2	2	2	2							
Cu	5	5	5	5	4	4	4	4	2	2	2								
Pd	4	3	3	3	2	4	4	3	2	2									
Ni	4	3	4	3	2	4	4	3	2										
Pt	3	4	3	3	2	4	5	3											
Fe	4	4	3	2	2	4	4												
Be	5	5	5	5	4	5													
Ti	4	2	2	3	4														
Co	4	5	4	3															
Cr	2	5	2																
Mo	2	2																	
Ta	2																		

2 - velmi dobrá  
3 - dobrá  
4 - částečná  
5 - španá

Obr. 5 – Svařitelnost materiálů za pomoci laserového svařování [4]

## 2.2 Plazmové svařování

### 2.2.1 Plazma

Z hlediska fyziky představuje plazma soubor nabitých a neutrálních částic, které se nacházejí v různých kvantových stavech a platí, že jako celek je plazma elektricky neutrální (kvazineutralita). Plazmy dělíme na izotermické, kde všechny částice mají stejnou teplotu a plazmy neizotermické, ve kterých teplota elektronů převažuje nad teplotou jiných částic [6].

Plazmy také dělíme na úplně nebo částečně ionizované. Teplota částečně ionizovaného plazmatu se pohybuje v rozmezí od 5 000 K do 15 000 K. Teplota úplně ionizovaného plazmatu dosahuje hodnot až 100 000 K.

Plazma je elektricky vodivá a podléhá vlivům jak elektrického, tak i magnetického pole. Plazmu lze vytvořit následujícími procesy:

- elektrickým výbojem – elektricky – za pomoci kompenzovaného iontového svazku
  - mechanicky – např. pád družice skrze atmosféru vytváří v plynné atmosféře plazmu na okrajích družice
- při jaderné reakci slučovací nebo rozpadové

V technické praxi se používá plazma neizotermická. Elektronový plyn této plazmy má jinou teplotu než ionty a atomy. Aby došlo k ionizaci plynu, což je klíčové ke vzniku plazmatu, je zapotřebí dané množství energie. Mezi vhodné zdroje této energie můžeme zařadit například teplo elektrického oblouku, který už sám o sobě je plazma. Pojem plazma se však používá teprve tehdy, když dojde ke kontrahování elektrického oblouku, což má za následek zvýšení teploty a patřičný stupeň ionizace. V technické praxi se používá pojem stabilizace oblouku, kdy oblouk dosáhne požadovaného stavu elektrického oblouku pro danou oblast technického použití. Ke stabilizaci elektrického oblouku lze dojít několika různými způsoby:

- použitím vody
- použitím proudícího plynu
- použitím plazmového hořáku ve tvaru dýzy

Teplotu plazmy ovlivňuje plyn, ze kterého plazma vzniká. Různé plyny mají různé fyzikální a chemické vlastnosti a různé vlastnosti ionizačních potenciálů. Kontrahovaný elektrický oblouk dosahuje požadovaných teplot v závislosti na použitém druhu plynu:

- dusíková plazma – 7000 K
- vodíková plazma – 8000 K
- argonová plazma – 15 000 K
- heliová plazma – 20 000 K

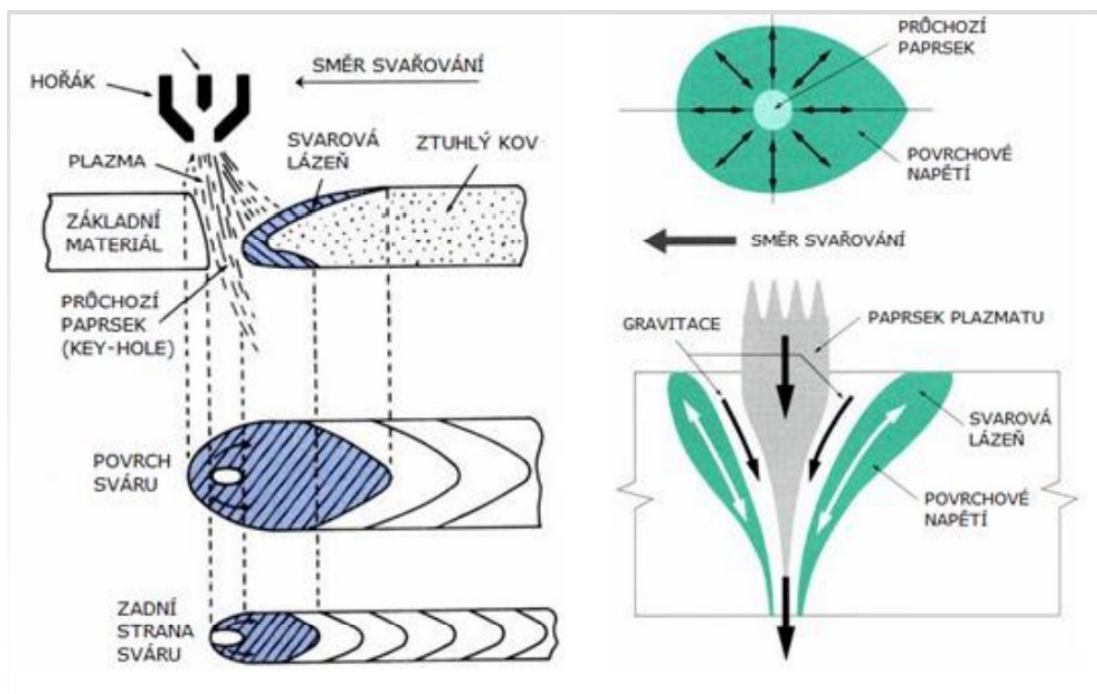
Plazma používaná v běžné praxi se vyznačuje níže popsányi vlastnostmi.

Mimo pružných srážek mezi částicemi (molekulami) se zde vyskytují i nepružné srážky, které jsou příčinou změny ve vnitřních kvantových stavech částic (molekul), eventuálně zapříčiňují jejich disociaci nebo ionizaci. Z této příčiny se homogenní chemický plyn mění na směs elektronů, fotonů, atomů iontů a jiných. Plazma obsahuje elektricky nabitě částice, jako jsou elektrony nebo ionty. Za pomoci těchto částic můžeme působit na plyn elektromagnetickým polem. Pole elektrické dokáže měnit směr pohybu částic a pole magnetické je schopno částice urychlit. Směs částic nacházejících se v plazmě je elektricky vodivá a od elektrického pole může buďto energii přijmout nebo ji odevzdat. Míra elektrické vodivosti plazmového oblouku je závislá na pohyblivosti elektronů, jejichž hodnota pohyblivosti je 100x vyšší než u iontů. Jako celek je směs částic (plynu) v plazmě, tzv. kvazineutrální, to znamená, že počet kladných a záporných částic je víceméně stejný [7].

### **2.2.2 Plazmové svařování**

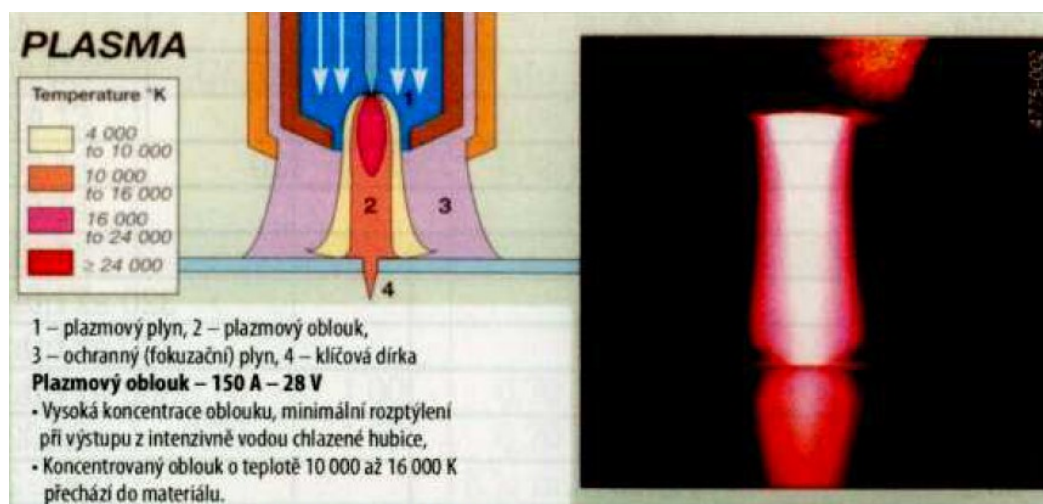
Svařování plazmou lze zařadit mezi moderní, vysoce stabilní a velmi produktivní metodu svařování s charakteristickým formováním svaru. Vysoce koncentrované teplo zajišťuje hluboké natavení základního materiálu. Proces svařování plazmou je velmi kvalitní a produktivní při téměř minimálním tepelném ovlivnění základního materiálu. Svar se vyznačuje charakteristickým průřezem, který připomíná vínový pohár [7, 8]. Jedná se o obměnu obloukového svařování prováděnou v plynné atmosféře (nejčastěji jde o ochrannou atmosféru) [7].

Fundamentálně se metoda podobá obloukovému svařování v ochranné atmosféře netavící se elektrodou (TIG – GTA metoda). Mezi netavící se elektrodou a základním materiálem hoří oblouk, a to v plynné atmosféře (atmosférou je nejčastěji inertní plyn). Důležitým prvkem při svařování plazmovým obloukem je zabezpečení stability hoření oblouku, aby nedošlo k vyfukování svarové lázně při výtokových rychlostech stabilizačního plynu [7].



Obr. 6 – Princip svařování plazmou a tvorba klíčové dírky [8]

Na Obr. 6 je schematicky znázorněno svařování pomocí plazmy s tvorbou klíčové dírky. Principem plazmového svařování je ionizace plynu, ke které dochází při průchodu plynu přes elektrický oblouk. U dvouatomových plynů (kyslík, vodík, dusík) nejdříve musí dojít k jejich disociaci, během které dojde k rozkladu plynu na jednotlivé atomy. Stupeň ionizace je závislý na teplotě, která u tohoto typu svařování dosahuje velmi vysokých hodnot, a to až do 16 000 °C [9]. Plazmové svařování demonstruje schéma na Obr. 7.



Obr. 7 – Schéma plazmového svařování [9]



Obvykle se při plazmovém svařování používají 3 druhy plynu, kde každý plní svou konkrétní roli.

#### 1) Plazmový plyn

Může se jednat o argon, dusík, vodík, hélium a směsi plynů. Průtok plazmového plynu je od 0,5 do 9,0 l/min. Za přítomnosti tohoto plynu vzniká ionizací plazmový oblouk.

#### 2) Fokusační plyn

Funkcí tohoto plynu je zúžení plazmového oblouku. Průtok fokusačního plynu je od 3 do 18 l/min. Pro účely tohoto plynu se používají směsi argonu s vodíkem nebo argonu s héliem.

#### 3) Ochranný plyn

Funkcí ochranného plynu je ochrana svarové lázně proti oxidaci. Pro tyto účely se používají inertní plyny. Průtok ochranného plynu je od 2 do 20 l/min, u aktivních materiálů, jako je titan, zirkon nebo tantal je to pak od 20 do 30 l/min [4, 9].

### 2.2.3 Plazmové hořáky

Důležitou součástí zařízení pro plazmové svařování je hořák. Plazmový hořák zajišťuje podstatné funkce pro správné docílení svařování. Základní funkcí je zajištění správné polohy wolframové elektrody a přívod proudu na elektrodu. V hořáku dochází ke vzniku hoření a následnému tvarování plazmového oblouku. Zajišťuje přívod plazmového, ochranného a fokusačního plynu. Může také zajišťovat dodání přídavného materiálu, pokud je to nutné. Hořák usměrňuje plazmový oblouk přímo na svařované místo. Vzhledem k vysokým teplotám působícím při plazmovém svařování, je hořák chlazený oběhem vody.

Plazmový svařovací hořák s přeneseným plazmovým obloukem – plazmový oblouk u svařovacího hořáku vzniká mezi elektrodou (wolframová elektroda) a základním materiálem. Pokud je to nutné, přivádí se přídavný materiál buďto manuálně nebo za pomoci hořáku. Používá se při svařování materiálů elektricky vodivých.

Plazmový svařovací hořák s nepřeneseným plazmovým obloukem – plazmový oblouk u tohoto typu hořáku vzniká mezi elektrodou a dýzou. Přídavný materiál se přivádí obdobně, jak je popsáno výše. Používá se při svařování materiálů elektricky nevodivých [4, 7]. Schématické znázornění svařování přeneseným a nepřeneseným plazmovým obloukem demonstruje Obr. 8.

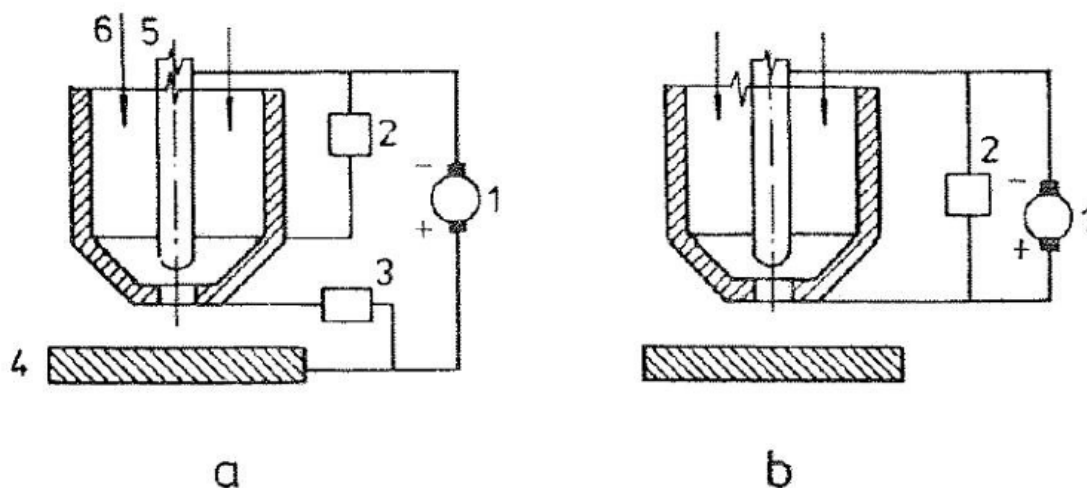


Schéma svařování plazmovým obloukem

*a* – přeneseným, *b* – nepřeneseným, 1 – zdroj svařovacího proudu, 2 – vysokofrekvenční zdroj, 3 – odpor pomocného oblouku, 4 – základní materiál, 5 – wolframová elektroda, 6 – plazmový plyn

Obr. 8 – Schéma svařování přeneseným a nepřeneseným plazmovým obloukem [4]

Svařování plazmou poskytuje hned několik výhod. Jednou z těch základních je jednoduchost přípravy spojů ke svaření, u materiálů do tloušťky 8 mm dokonce není nutné úkosovat svarové plochy. Je vhodné materiály očistit od rzi, mastnoty, nečistot a jiných nežádoucích jevů. Další výhodou je tvar formovaného svaru, který je velmi charakteristický pro tuto metodu svařování. Svar je velmi kvalitní, má dobrou odolnost proti korozi, dobré pevnostní vlastnosti a představuje i úsporu přídavného materiálu. Velkou výhodou je minimální tepelné ovlivnění základního materiálu v okolí provedeného svaru a tím i menší deformace základního materiálu. Metoda je velmi stabilní, poskytuje vysokou produktivitu práce a možnost mechanizace procesu [4, 7, 9].

Plazmou lze svařovat všechny druhy oceli, titan, hliník, měď, molybden, nikl a slitiny těchto kovů. Svařují se většinou tloušťky od 2 do 10 mm. Používá se napětí od 28 do 40 V a proud od 110 do 300 A. Oproti metodě TIG se plazmové svařování vyznačuje mnohem vyšší svařovací rychlostí. Jednou z nevýhod metody je relativně vyšší spotřeba plynu z důvodu vytvoření plazmového oblouku ionizací [4, 9].

#### 2.2.4 Aplikace plazmového svařování

Plazmové svařování se používá v mnoha odvětvích, mezi které patří na příklad automobilový, letecký, jaderný, chemický a elektrický průmysl. Významné je svařování titanu a chromoniklových ocelí [4, 8]. Významnou metodou je mikro plazmové svařování, které se

vyznačuje nízkou hodnotou použitého proudu. Speciální výhodou této aplikace je svařování plechů o tloušťce menší než 1 mm. Daná metoda mikro plazmového svařování se používá při výrobě měřících přístrojů, kovových kapslí, kovové tkaniny, kondenzátorů, membrán a termočlánků [10]. Příklad plazmově svařované plechové desky z titanové slitiny znázorňuje Obr. 9.



Obr. 9 – Plazmou svařovaná plechová deska Ti-6Al-4V [11]

### 2.3 Svařování výbuchem

Svařování výbuchem bylo poprvé zaznamenáno během druhé světové války. Bylo zjištěno, že síla výbuchu bomby a žár v centru exploze způsobil trvalé spojení některých materiálů (např. kovové úlomky granátů a bomb). K většímu rozvoji této metody svařování došlo až v 60. letech XX. století, kdy americká chemická společnost DuPont provedla reprodukci tohoto jevu v laboratoři. Tato společnost poté uskutečnila praktické provedení svařování výbuchem a nechala si jej úspěšně patentovat. Tak vznikl americký patent US3140539 – Proces pro spojování kovů výbušnými prostředky. Dnes se touto metodou zabývá více než 50 společností po celém světě s roční produkcí odhadovanou v rozsahu od 300 000 tun. V České republice tato metoda zatím rozšířená není z důvodu vysokých nároků na bezpečnostní podmínky a potřeby velkého prostoru k zajištění ochrany před rázovou vlnou vznikající během procesu. Nejbližší velkou společností, provozující metodu svařování výbuchem je Explomet – Opole a nachází se v Polsku. Tato firma ke svému fungování využívá vojenský komplex, podobně jako Ruské firmy. Americké firmy vyřešily problém s rázovou vlnou vybudováním podzemních komplexů a jeskyní [12, 13].

Od doby jeho vzniku je proces neustále zlepšován a mnohem častěji využíván. Svařování výbuchem nalézá velké využití hlavně v automobilovém, leteckém, lodním, stavebním a těžebním průmyslu. Nejběžněji se tato technologie využívá při výrobě plátovaných plechů,

kteře jsou složené ze dvou různých kovů. Příkladem může být například materiál na bázi titanu s korozivzdornou ocelí, který se využívá pro tlakové nádoby, které musí kvůli vlivům prostředí disponovat vysokou odolností proti korozi, odolností vůči vysokým teplotám a tlaku. Dalším příkladem může být svařování materiálu Ni-Ti [13].

### **2.3.1 Výbušniny používané při svařování výbuchem a výbuchové přeměny**

Výbušniny jsou takové látky nebo směsi látek, které jsou schopny přeměny při výbuchu. Charakteristickými znaky této přeměny jsou: velmi vysoká rychlost chemické reakce, během které dochází k uvolňování tepla, která dále vykazuje schopnost samovolného šíření reakce, vzniku plyných explozních spalín.

Vlivem vysoké teploty v místě výbuchové reakce a velkého množství nacházejících se zde plynů, dochází ke vzniku vysokého tlaku. Během expanze plynu do okolí probíhá přeměna tepelné energie na mechanickou. Výbuch sám o sobě není charakterizován vysokým množstvím energie, ale jelikož reakce probíhá ve velmi malých jednotkách času, má výbuch velmi velký výkon. Běžně používané výbušniny mají hodnotu výbuchového tepla kolem 4000 kJ/kg. Tato hodnota není nijak velká, je běžně dostupná a používaná paliva mají podstatně vyšší hodnotu spalného tepla. Jak již bylo zmíněno, reakční čas je velmi malý. Nabývá hodnot v rozmezí od  $10^{-3}$  do  $10^{-4}$  sekundy. Spojením energie výbuchu a nízkého reakčního času může výkon dosahovat hodnot  $10^7$  a  $10^8$  kW/kg.

Výbuch můžeme rozlišit podle rychlosti reakce a rozložení tlaku na tři typy:

- výbuchové hoření
- detonace (výbuch 1. řádu)
- vlastní výbuch (výbuch 2. řádu)

Výbuchové hoření je charakterizováno pomalým průběhem reakce. Plyny a spaliny vzniklé během výbuchu unikají včas a tím nedochází ke zvýšení tlaku. U tohoto typu výbuchu hraje velkou roli rychlost hoření. Ta je závislá na druhu výbušniny a okolních podmínkách. Největší roli z okolních podmínek hraje tlak. S rostoucím tlakem vzrůstá rychlost hoření, ale ani při velkých tlacích kolem  $10^2$  MPa nepřekročí rychlost 1 m/s. Rychlost hoření se neustále zvyšuje v uzavřeném prostoru.

Během výbuchu 1. řádu dochází k šíření výbuchu maximální možnou konstantní rychlostí, která přesahuje rychlost šíření zvuku v daném materiálu. Detonace je stacionární formou výbuchu, která k šíření stlačení látky využívá rázovou vlnu vzniklou během výbuchu. Rychlost

detonace je ve velkém intervalu nezávislá na okolních vlastnostech teploty a tlaku. Hodnoty rychlosti detonace dosahují hodnot od  $10^3$  m/s do  $9 \cdot 10^3$  m/s. Detonace se iniciuje za pomoci rozbušky.

Při výbuchu 2. řádu dochází ke zvýšení tlaku poblíž reakční zóny nad tlak okolí. Reakce se s časem rychle mění, rychlost reakce dosahuje hodnot až  $10^3$  m/s. Ve finálním stádiu tento typ výbuchu obvykle přechází ve výbuch 1. řádu, tedy detonaci [12, 13].

Mezi výbušniny lze zařadit samostatné látky a také různé směsi těchto látek. Mohou se vyskytovat v kondenzovaném, kapalném a plynném stavu. Kondenzované výbušniny lze dle využití rozdělit na trhavin, střeliviny a třaskaviny. Hlavním typem výbuchové reakce u trhavin je detonace. Právě trhavin mají pro spojování kovů explozí největší uplatnění a význam. V tabulce 1 lze nalézt nejdůležitější a nejvíce používané druhy trhavin pro explozní svařování [13].

**Tabulka 1** Přehled nejdůležitějších jednosložkových trhavin a jejich vlastnosti [13]

Technický název	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Detonační rychlost (m/s)	Výbuchové teplo (kJ/kg)	Objem spalin (dm <sup>3</sup> /kg)
Nitroglycerin	1,60	7 600	6 300	715
Pentrit	1,72	8 200	6 120	780
Hexogen - RDX	1,80	8 750	5 460	910
Tritol - TNT	1,65	6 950	4 100	690
Kyselina pikrová	1,80	7 300	4 400	675

V průmyslové praxi se z ekonomických důvodů nejčastěji používají směsi trhavin, jelikož vhodnou kombinací trhavin lze docílit požadovaných vlastností s lepším ekonomickým výsledkem. Průmyslově používané trhavin se dělí podle jejich konzistence na sypké, poloplastické a plastické. Skládají se ze dvou hlavních skupin látek – oxidovadel a paliv. Správným poměrem, homogenizací a namletím složek trhaviny se docílí požadovaných výbuchových vlastností, jako je na příklad rychlost reakce. Každá trhavin má mít ideální vlastnosti pro daný technologický proces, ve kterém je používána. Trhavin musí být bezpečná pro manipulaci, nesmí projevovat sklony stárnutí a během skladování by si měly zachovat všechny explozní, fyzikální, chemické a také mechanické vlastnosti.

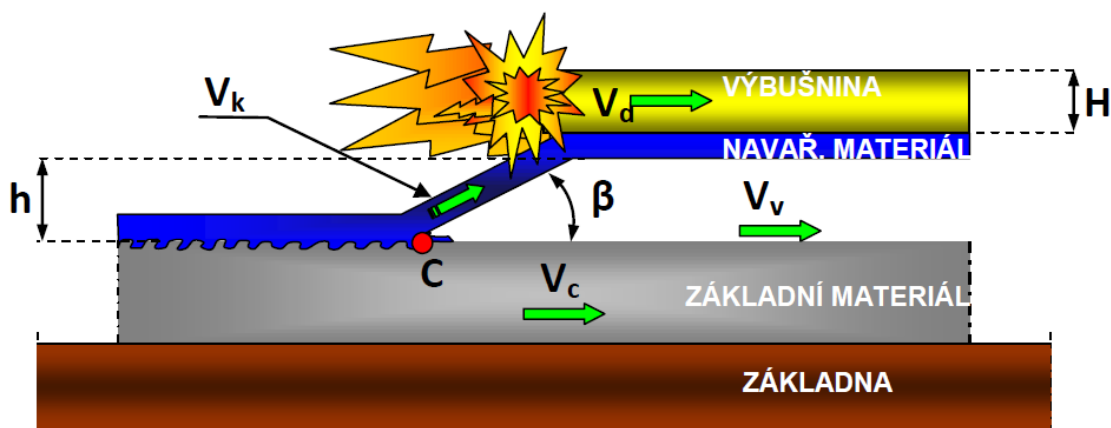
Při svařování výbuchem se používají dvě skupiny trhavin. Do první skupiny patří dusičnan amonné trhavin, který je modifikován, aby nejvyšší možná rychlost detonační reakce nepřesahovala hodnotu 3500 m/s. Do druhé skupiny patří sypké směsi krystalizačních trhavin obsahující inertní přísady, které dokážou snížit objemovou hustotu energie nálože, následkem

čehož se snižuje i detonační rychlost trhaviny. Do této skupiny lze zařadit směs TNT s chloridem sodným. Pro svařování výbuchem je vhodná také směs Semtex S. Jedná se o směs pentritu a uhličitanu sodného. Jsou to sypké trhaviny, které na vzduchu nevlhnou, proti vodě však odolné nejsou. Velmi dobře se skladují, nedochází k jejich ztvrdnutí nebo spékání.

Trhaviny používané pro svařování výbuchem, které se ve většině případů používají, spadají do klasifikace tzv. neideálních trhavin. Popsat jejich výbuch pomocí fyzikálně stavové rovnice, která se používá pro extrémně vysokorychlostní vojenské výbušniny, je obtížné. To je způsobeno tím, že prakticky ve všech případech jsou použity výbušniny, které mají zrnitý charakter a jako hlavní složku obsahují dusičnan amonný. K výrobě již konkrétního typu trhaviny se používají také další složky typu: senzibilizátory, ředidla a činidla se schopností řídit hustotu. Tyto složky slouží k dosažení ideálních požadovaných vlastností na rychlost výbuchu, vznikající tlak a čas jeho působení. Vhodná rychlost detonace neideálních výbušnin by měla být v intervalu od 2000 do 3000 m/s. Detonační vlastnosti trhavin jsou charakterizovány několika parametry, mezi které patří: složení, velikost částic a jejich distribuce, tloušťka vrstvy, hustota, vlhkost, stáří trhaviny. Výkon trhaviny by měl být správně zvolen podle typu materiálu (kovu) s ohledem na jeho hustotu, rychlost šíření zvuku v tomto materiálu a v neposlední řadě na jeho rozměrech, zvláště pak jeho tloušťce [13].

### 2.3.2 Princip svařování výbuchem

Principem metody je spojování kovových materiálů za použití exploze, která vznikne při chemické reakci, a to má za následek vznik vysokého tlaku. Probíhající chemická reakce vede ke vzniku vysokých teplot (až 5000 °C), ale pouze pro dobu několika nanosekund. Tato reakce má za následek vytvoření rázové vlny o tlaku 5-50 GPa, která prostupuje kovem a je mnohonásobně větší než mez kluzu v tlaku spojovaných materiálů. Tlaková energie se tedy přemění na deformační a tím dojde k plastické deformaci na kontaktní ploše. Tento děj lze popsat hydrodynamickou teorií ideální kapaliny. Rázová vlna vzniklá explozí se skládá ze dvou proudů. Jedním z nich je tzv. *tlouk*, který zůstává na linii srážu a druhým je tzv. *trysk*, který má čistící efekt, je tvořen povrchovými oxidy. Stlačeným horkým vzduchem a částicemi kovů vytváří na rozhraní materiálů typické zvlnění. Pro zajištění optimálního svarového spoje je nezbytné, aby měla rychlost exploze nižší hodnotu než rychlost šíření zvuku ve spojovaných materiálech. Svarový spoj, který při procesu vznikl, má metalurgickou povahu a často dosahuje lepších pevnostních vlastností v porovnání se základním a navařovaným materiálem [12, 13]. Obrázek 10 schematicky znázorňuje průběh procesu vlastního svařování výbuchem a tvorbu vlnového rozhraní mezi základním materiálem a navařeným.



Obr. 10 – Proces svařování výbuchem [12]

$V_v$  – rychlost vzduchu,  $V_k$  – rychlost kolize,  $V_d$  – rychlost detonace (výbuchu),  $V_c$  – rychlost svařování,  $\beta$  – úhel svařování materiálu,  $h$  – vzdálenost mezi spojovanými materiály,  $H$  – tloušťka vrstvy výbušniny,  $C$  – bod srážu spájených materiálů

Během přechodu čela detonační vlny s danou detonační rychlostí dojde k okamžité deformaci materiálů a ten letí určitou rychlostí na základní materiál. Místo, ve kterém došlo k nárazu spájených materiálů je označeno  $C$  a pohybuje se ve směru detonace rychlostí  $V_c$  a zároveň představuje rychlost svařování. V současné době se při výbuchovém svařování využívá paralelně situované spojování materiálů, kde úhel svařování materiálu  $\beta = 0$ .

Mezi základní parametry pro svařování výbuchem tedy řadíme geometrii uložení (úhel svařování materiálu –  $\beta$ , vzdálenost mezi spojovanými materiály –  $h$ , typy uložení geometrie) a parametry výbušniny (tloušťka výbušniny –  $H$ , rychlost detonace –  $V_d$ ).

Nárazová rychlost urychlovaného materiálu je stejná v každém okamžiku:

$$V_v(t) = 2V_d \cdot \sin \frac{\vartheta(t)}{2} \quad (4)$$

kde  $V_d$  je detonační rychlost výbušniny použité při procesu,  $\vartheta$  je poměr násobků vrstvy trhavin a měrné hmotnosti výbušniny k násobku tloušťky a měrné hmotnosti napojovaného materiálu [12]

Určení dráhy letu materiálu v závislosti na čase je složité. V praxi se proto vychází ze zkušenosti, že se v běžných podmínkách dráha, na které se dosáhne urychlení na konečnou rychlost, rovná až dvojnásobku tloušťky plátujícího plechu. Toto platí v případě, že se předpokládá šíření detonační vlny s rovinným čelem přes trhavinu. Tento děj bude probíhat na

celé ploše stacionárně napojovaného materiálu a dojde k deformaci plechu jednoduchým ohybem. Takovýto případ je v praxi uskutečnitelný jen do určité šířky nálože. Další předpoklad, který vznikl při analyzování urychlování materiálu, je takový, že se předpokládá nekonečně široký materiál s náloží. Tento předpoklad je teoretický a nerealizovatelný. Jedná se o ideální případ, který je neuskutečnitelný pro rovinné uspořádání materiálů při svařování. Určení dráhy letu na okrajích materiálu bude jiné. Proces je tam odlišný, protože dochází k expanzi detonačních spalin i do volného prostoru po okrajích nálože. Na rovinném plechu dochází ke vzniku vlnitosti, která se kvůli neomezené dráze letu materiálu postupně zvětšuje, jelikož dochází k neustálému zpoždování okrajů plechu. Šířka ovlivněných okrajů bude zhruba rovna tloušťce trhavin. Toto platí v případě, že se uvažuje let na vzdálenost konečného urychlení, což je obvykle maximálně dvojnásobek tloušťky urychlovaného materiálu. Právě o tuto ovlivněnou šířku musí v praxi materiál s náloží přecházet po obvodu základního materiálu. Dojde k zachování stálých podmínek tvorby spoje, a to až k okrajům spojovaných materiálů [14].

Vlivem výbuchu vznikají tlakové vlny, které se šíří stejně všemi směry od ohniska výbuchu. Šíření vln je však úzce spjato s uložením výbušniny. Velikost detonační rychlosti určuje tvar rozhraní svarového spoje. Rozhraní může být zvlněné nebo plošné. Podle vlastností svařovaného materiálu se volí detonační rychlost. Při paralelním uložení svařovaných materiálů by detonační rychlost neměla přesahovat rychlost šíření zvuku ve svařovaných materiálech. Během detonace může ale dojít i k tomu, že se navařovaný materiál poškodí. Poškození může také vyvolat vzduchová bublina mezi trhavinou a urychlovaným materiálem. Poškození je v tomto případě vyvoláno adiabatickou kompresí vzduchové vrstvy. Této situaci se dá předejít vložením pevné nebo plastické mezivrstvy mezi navařovaný materiál a trhavinu [12].

U symetrického spojení materiálů, které byly urychleny detonací, může dojít k rozdělení nárazové síly materiálů v místě spoje do více směrů. Vysoký tlak vznikající při detonaci trhavin vytváří z pohybujícího se vzduchu mezi oběma povrchy materiálů plazmu. Plazma vzniká před bodem srážu spojovaných materiálů a disponuje vyšší rychlostí než detonační rychlost vzniklá při explozi trhavin. Předpoklad vzniku plazmy je podmíněný pohybem spojovaných materiálů vzhledem k bodu srážu podzvukovou rychlostí vztahující se na spojované materiály – podzvukový sráz. U nesymetrického spojení materiálů dochází tehdy, když exploze trhavin urychlí pouze jeden z materiálů. Druhý z materiálů v tomto případě zůstane v klidu. Podmínkou pro spojení je zde podzvukový sráz, který se vztahuje na kov, ve kterém je z dané dvojice materiálů nižší hodnota rychlosti šíření zvuku. Rychlost kolize postupu



srázu materiálů musí mít menší hodnotu, než je hodnota šíření zvuku ve spojovaných kovech. Vzniklá plazma během podzvukového srázu má velký význam u tvorby svarového spoje. Tuto plazmu tvoří rozžhavené částice spojovaných materiálů. Plazma má čistící účinky pro svarovou plochu. Zbavuje ji oxidů, nečistot a tím připravuje svarovou plochu pro vhodné spojení materiálů za vysokého tlaku [12].

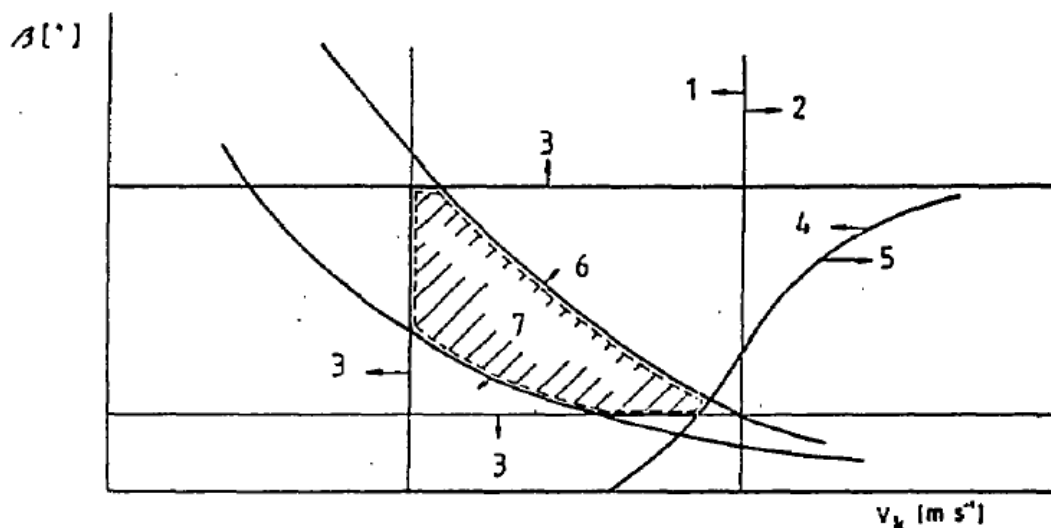
### 2.3.3 Svařitelnost materiálů výbuchem

Výbuchem je možno svařovat materiály s velmi rozdílnou teplotou tavení, lze svařovat kovy, které netvoří tuhé roztoky a také kovy, které vytvářejí křehké intermetalické fáze. Svařování výbuchem je vhodné použít v případě, že je svarový spoj dlouhodobě vystaven vysoké teplotě, která může vést k degradaci svarového spoje [15]. Výbuchem se také dobře svařují materiály s vysokou plasticitou. Jelikož svar vzniká pod teplotou tavení materiálu, lze také svařovat různé kombinace materiálů. Jako příklady těchto kombinací lze uvést např. ocel s titanem, mědí, niklem, hliníkem, platinou, molybdenem, nástrojovou ocelí, uhlíkovou ocel s Cr/Ni ocelí. Lze spojovat plechy od tloušťky až 30 mm, ale také tenké fólie o tloušťkách 0,1 mm [12]. Výbuchem lze spojovat téměř všechny kovy. Neexistují žádná omezení pro tloušťku základního materiálu. Vymezené hodnoty tlouštěk se spojují bez problémů [16]. Aby došlo k dobrému svaření materiálů, musí být rychlost svařování zhruba rovna rychlosti šíření zvuku v materiálech [12]. Tabulka 2 zobrazuje rychlosti šíření zvuku ve vybraných materiálech.

**Tabulka 2** Rychlost šíření zvuku v materiálech [12]

Druh materiálu	Rychlost zvuku [m/s]	Druh materiálu	Rychlost zvuku [m/s]
Hliník	5370	Austenitická ocel	4550
Měď	3970	Titan	4786
Hořčík	4493	Zirkon	3771
Molybden	5173	Cín	3100
Nikl	4667	Ocel	4600

Svařované materiály musí však mít požadované mechanické a fyzikálně-chemické vlastnosti. Měly by být zachovány určité rozměry a materiály musí být geometricky rovinné. Je také třeba opracovat svarové plochy na požadovanou drsnost a očistit od všech nežádoucích nečistot. Trhavinu je třeba zvolit podle požadovaných vlastností pro konkrétní spojované materiály a je třeba ji rozmístit po celém povrchu navařovaného materiálu rovnoměrně [15]. Obr. 12 znázorňuje okno svařitelnosti, kde každý bod popisuje jednotlivé parametry svařování.

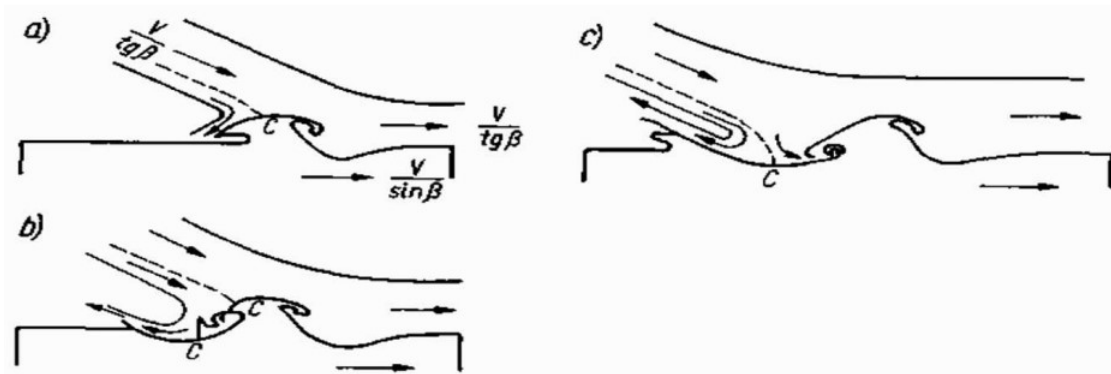


Obr. 12 – Okno svařitelnosti (závislost úhlu svařování  $\beta$  na rychlosti kolize  $V_k$ ) [15]

Zaznačené hranice a směry ukazují možnosti svařování, kde 1 – svařené, 2 – nesvařené, 3 – bez zvlnění, 4 – trysk, 5 – bez trysku, 6 – natavené svarové rozhraní, 7 – zvlněná oblast rozhraní [15]

### 2.3.4 Mechanismus formování vln při výbuchovém svařování

Bylo navrženo již několik mechanismů pro vytvoření vln ve svarovém spoji. První vysvětlení mechanismu vzniku vln představil Abrahamson. Vycházel z předpokladu, že vlny vznikají působením tlaku plátovaného materiálu na základní materiál, kdy během toho dochází v daném materiálu k vytvoření prohlubní. Vlnitost spoje je způsobena nepravidelnými srážky materiálu, které jsou zapříčiněny nepravidelnou rychlostí exploze [12, 14]. Tento předpoklad byl dále detailněji popsán a vysvětlen Bahráním a Crosslandem. Dle interpretace těchto autorů dochází ke vzniku vln pomocí tlaku plátovaného materiálu na základní materiál, při čemž prohlubně jsou tvořeny rázy nepravidelného charakteru, což zapříčiňuje vlnitý tvar svarového spoje. Zmíněná nepravidelnost je z velké části způsobena změnami v rychlosti exploze [12]. Obr. 13 popisuje model mechanismu vzniku vln.



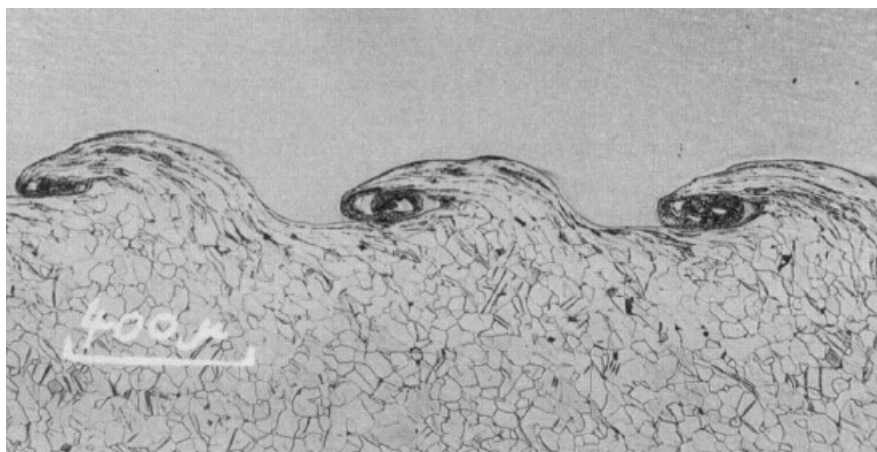
Obr. 13 – Model mechanismu vzniku vln [17]

kde a) rozdělení a formace proudění, b) formování oblastí zahloubení a víření,  
c) ukončení procesu [17]

Byly představeny také alternativní mechanismy vzniku vln. Bylo navrženo a provedeno mnoho experimentů, které měly za cíl nalezení souvislostí mezi velikostí vln ve vlnovém spoji a elastickými vibracemi v základním materiálu. Nicméně nebyl prokázán vztah mezi těmito dvěma jevy.

Základem dalšího prozkoumávaného předpokladu je unikající tok vzduchu, který uniká během srážu obou materiálů. Tento vzduch je zahříván na vysokou teplotu a dochází ke vzniku plazmy, která zahřívá a roztavuje povrchy obou materiálů. Vlivem natavení plochy by mohla plazma způsobit vlny v mezifázovém rozhraní materiálů. Jev byl zkoumán za pomoci experimentu, během kterého se výbuchem svařovaly dva materiály. Výbušnina nebyla umístěna na okraje navařovaného materiálu, aby se ukázalo, jestli se vlny budou tvořit i po okrajích materiálu. V případě, že by se vlny tvořily i na určité vzdálenosti od vrstvy pokryté výbušninou, byl by tento předpoklad správný. Plazma vzniklá během detonace by díky vysoce stlačenému vzduchu pokračovala ve tvorbě vln i za hranicí výbušné vrstvy. Nicméně při metalografické a vizuální kontrole vzorku po svařování nebyly nalezeny známky vln ve spoji mimo oblast pokrytou výbušninou. Z toho vyplývá, že vlny ve spoji, který vznikl během výbuchového svařování nejsou tvořeny plazmou.

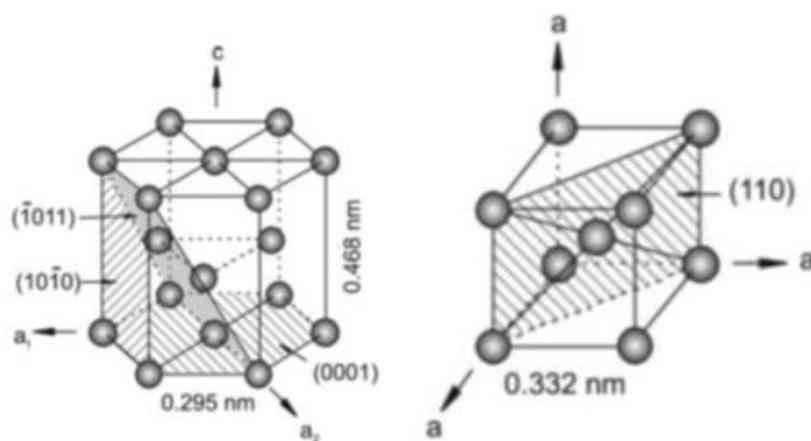
Výsledky experimentů ukázaly, že tvorba vln vazebné zóny během výbuchu je analogická s tvorbou vířivých proudů v proudění kapaliny kolem překážky nebo při kolizi proudů kapaliny. Analogie proudění kapaliny vysvětluje, že je pozorován přechod z hladké vazebné zóny kov-kov do zvlněné vazebné zóny nad kritickou rychlostí sbíhání [18]. Na Obr. 18 je znázorněn charakteristický vznik vln výbuchem svařovaného titanu s ocelí.



Obr. 14 – Typické zvlnění spoje titanu a oceli [18]

## 2.4 Titan

Titan je technicky významný kov, jehož charakteristickými vlastnostmi jsou především vysoký poměr pevnosti k hustotě a velmi dobrá korozní odolnost. Do teploty 882 °C se čistý titan vyskytuje v  $\alpha$ -fázi, má hexagonálně těsně uspořádanou krystalovou mřížku – HTU (anglicky HCP). Při přechodu nad teplotu 882 °C se krystalová struktura transformuje na  $\beta$ -fázi, která má mřížku kubickou prostorově centrovanou – KSC (anglicky BCC) [19].



Obr. 15 – Krystalografické mřížky titanu a jejich mřížkové parametry, vlevo  $\alpha$ -fáze, vpravo  $\beta$ -fáze [19]

### 2.4.1 CP Ti

Komerčně čistý titan obsahuje více než 98 % titanu a pouze velmi malé množství nečistot. Mezi nečistoty mohou patřit např. kyslík, vodík, uhlík, železo, křemík a dusík. Příměsí kyslíku, uhlíku a dusíku zvyšují pevnost v tahu titanu, ale zapříčiňují snížení jeho plasticity. Vzhledem k vlastnostem těchto příměsí existují řádná omezení pro jejich výskyt v komerčně čistém titanu, zvláště pak výskyt kyslíku [20]. Vodík má při pokojové teplotě v  $\alpha$ -titanu relativně nízkou

rozpustnost. Při překročení rozpustnosti vytváří vodík v titanu hydridy, které doprovází k vodíkovému křehnutí, což má za následek vyšší křehkost. Rozpustnost vodíku stoupá s rostoucí teplotou, a proto je možné ho využít jako legující prvek pro stabilizaci  $\beta$ -fáze [19]. Po dosažení konkrétního množství vodíku v CP-Ti dojde k výraznému snížení hodnoty vrubové houževnatosti. V komerčně čistém titanu by obsah vodíku neměl překročit hranici 0,015 %. Rozlišujeme třídy (Grade) 1, 2, 3 a 4, které se liší svým složením a obsahy příměsí, kde třída 1 představuje komerčně nejčistší titan. Tyto třídy jsou specifikovány podle americké společnosti pro testování materiálů ASTM International [20]. Tabulka 3 zobrazuje složení a obsahy příměsových prvků komerčně čistých slitin titanu tříd 1, 2, 3 a 4.

**Tabulka 3** Třídy komerčně čistého titanu a obsahy jejich příměsí v hm % [20]

ASTM CPTi	Ti	Fe	C	O	H	N
Grade 1	Zůstatek	0.20	0.08	0.18	0.015	0.03
Grade 2	Zůstatek	0.30	0.08	0.25	0.015	0.03
Grade 3	Zůstatek	0.30	0.08	0.35	0.015	0.05
Grade 4	Zůstatek	0.50	0.08	0.40	0.015	0.05

Co se týče mechanických vlastností, vyznačuje se titan velmi dobrou svařitelností, tvářitelností, ale mezi horší vlastnosti patří obrobitelnost. Mechanické vlastnosti závisí na čistotě. Zpravidla se mez pevnosti u titanu pohybuje od 170 do 480 MPa, mez pevnosti v tahu od 240 do 550 MPa, tažnost na krátké tyči ( $A_5$ ) 20-30 %, u vysoce čistého titanu až 70 % [19]. Tabulka 4 znázorňuje mechanické vlastnosti v tahu komerčně čistých tříd titanu. Tabulka 5 zobrazuje tvrdost tříd komerčního titanu podle Vickerse (HV).

**Tabulka 4** Mechanické vlastnosti tenkých plechů komerčně čistého titanu [19]

Označení materiálu	Max.obsah (%)		Min.pevnost v tahu (MPa)	Min.mez kluzu (MPa)
	O	Fe		
Nelegovaný titan, grade 1	0,18	0,20	240	170
Nelegovaný titan, grade 2	0,25	0,30	345	275
Nelegovaný titan, grade 3	0,35	0,30	450	380
Nelegovaný titan, grade 4	0,40	0,50	655	485

**Tabulka 5** Tvrdost tříd komerčně čistého titanu podle Vickerse [21]

Vlastnost	Grade 2	Grade 4	Grade 4 SPD	Grade 5
Tvrdost HV	171,3	267,8	453,2	435,7

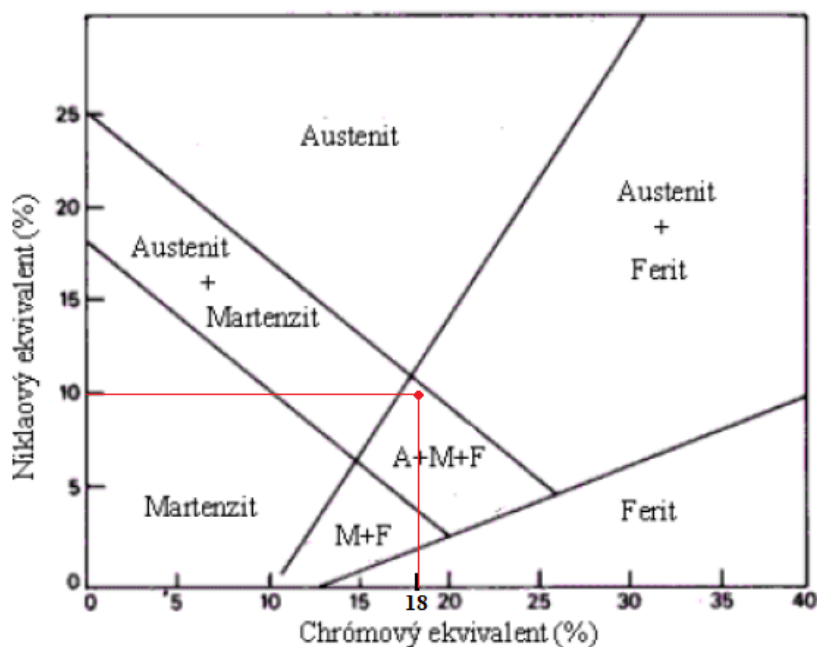
Titan patří mezi reaktivní kovy. Při zahřátí se stává více reaktivní než při pokojové teplotě a reaguje s kyslíkem, vodíkem, dusíkem a oxidy uhlíku. Působením oxidu během svařování dochází ke znehodnocení vznikajícího svaru a z tohoto důvodu je třeba použít ochrannou vrstvu od teploty vyšší než 342 °C. Titan při běžné pokojové teplotě oxiduje na svém povrchu. Před procesem svařování je nutné mechanicky odstranit povrchovou vrstvu oxidu a další nečistoty [22]. Aby nedošlo k narušení kvality svaru, je vhodné použít metody, při kterých nedochází ke kontaktu s běžnou atmosférou – vzduchem [23]. Pro svařování titanu se používají metody TIG (svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu), třecí svařování a výbuchové svařování. V praxi je důležité spojování titanu a oceli, pro které se používají obdobné metody. Svařování titanu s ocelí díky využitelnosti a mechanickým vlastnostem obou materiálu je velmi důležitým procesem [24].

## **2.5 Antikorozní oceli**

Antikorozní oceli jsou vysokolegovanými ocelmi, kde je hlavním legujícím prvkem chrom a druhým nejdůležitějším prvkem je nikl. Vykazují vysokou odolnost vůči chemické a elektrochemické korozi. Povrch antikorozních ocelí podléhá pasivaci a vzniklá vrstvička vytvoří ochranu proti korozi, která vzniká v oxidačním prostředí. Aby mohlo k pasivaci dojít, musí být obsah chromu v oceli vyšší než 11,5 %. Obsah uhlíku u tohoto typu oceli je nízký, jelikož uhlík může vytvářet v tuhém roztoku karbidy chromu, které zapříčiňují snížení obsahu chromu. Pokud bude obsah chromu snížen, dojde ke zhoršení antikorozních vlastností. Vznik karbidů chromu na hranicích zrn může zapříčinit mezikrystalickou korozi. Tento typ koroze se velmi často vyskytuje v tepelně ovlivněné zóně vzniklé po svařování. Mezikrystalické korozi se dá předejít snížením obsahu uhlíku v antikorozní oceli pod hodnotu 0,03 %. Snížením uhlíku pod tuto hranici lze předejít vzniku karbidů chromu. Dalším způsobem, jak předejít tomuto typu koroze, je přidáním prvku, jehož afinita k uhlíku je vyšší než afinita uhlíku ke chromu. Mezi takové prvky můžeme zařadit např. niob, titan a tantal. Struktura antikorozních ocelí je závislá na obsahu prvků, které mohou způsobit rozšíření nebo zúžení austenitické oblasti. K uzavření austenitické oblasti dojde přibližně při 12 % obsahu chromu. Rozšíření austenitické oblasti způsobují austenitotvorné prvky, mezi které patří např. nikl, mangan, uhlík nebo dusík. Tyto prvky mají také schopnost snížit teplotu martenzitické přeměny. Schäfflerův diagram (Obr. 16) vyjadřuje, jak působí chemické složení na výslednou strukturu antikorozní oceli. Prvky uzavírající austenitickou oblast jsou charakterizovány tzv. ekvivalentem chromu a prvky rozšiřující austenitickou oblast charakterizuje tzv. ekvivalent niklu.

### 2.5.1 Antikoroziční ocel 18/10

Jedná se o chromniklovou korozivzdornou ocel. Ocel obsahuje jako hlavní legury 18 % chromu a 10 % niklu. Nikl výrazně přispívá ke zvýšení antikorozních vlastností. Struktura chromniklových ocelí může být austenitická. Obr. 16 zobrazuje Schäfflerův diagram, kde jsou červeně vyznačeny obsahy niklu a chromu oceli 18/10 a lze z něj vyčíst, že strukturu této oceli tvoří hlavně austenit (KPC mřížka), dále zbytkový ferit a eventuálně martenzit [12, 25].



Obr. 16 – Schäfflerův diagram [12]

Chromniklové antikoroziční oceli vykazují velmi dobré antikorozní vlastnosti. Mají také dobré mechanické vlastnosti, ačkoliv mez kluzu je relativně nízká a obvykle se pohybuje v rozmezí 230-300 MPa. Ke zlepšení meze kluzu se používá různé metody tváření (válcování, plastická deformace za studena). Houževnatost antikorozních ocelí je vysoká. Tažnost obvykle bývá v rozmezí 45-65 %. Také změnou chemického složení lze docílit zlepšení požadovaných vlastností oceli. V praxi byly získány uspokojivější výsledky s větší přísadou molybdenu a wolframu. Byla zaznamenána menší praskavost svarových spojů a menší citlivost na hrubnutí austenitického zrna. Nevýhodou těchto ocelí je cena, jelikož obsahují značné množství niklu, který je drahý. Výhodou je vysoká odolnost proti korozi, dobré mechanické vlastnosti a velmi dobrá svařitelnost. Mezi vhodné metody spojování lze zařadit např. svařování plazmovým obloukem, svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu (TIG), laserové svařování, třecí svařování a další metody. Používají se hlavně v chemickém průmyslu a tam, kde je vyžadovaná vysoká odolnost proti chemické nebo elektrochemické korozi [12, 25, 26].

**Tabulka 6** Příklad chemického složení chromniklové oceli 18/10 (hm %) [12]

CrNi 18/10 deska						
Mn	Cr	Ni	Si	P	S	C
1,9	18,4	9,8	0,46	0,006	0,011	0,04

## 2.6 Svařitelnost titanu s antikorozi ocelí

Svařování odlišných kovů bývá zpravidla obtížné. Svařitelnost závisí hlavně na teplotě tání materiálů, plastických vlastnostech a chemickém složení. Nepříznivým jevem je také vznik křehkých intermetalických fází, kdy dochází kvůli rozdílu teploty k tavení a vzniku intermetalické fáze jednoho z materiálů, zatímco druhý materiál se ještě nezačal tavit. Pokud jde o tlakové svařování, důležitým parametrem je také hustota, stlačitelnost, tepelná vodivost a tvrdost [13, 28].

Spojování titanu s ocelí se provádí pomocí nekonvenčních metod svařování. Důvodem je, že se jedná o materiály s různými vlastnostmi, jak chemickými, tak mechanickými. Titan je neželezným kovem s vysokou teplotou tání 1668 °C, který při vyšší teplotě reaguje s atmosférickými plyny, tudíž je jeho svařování v běžné atmosféře nemožné. Teplota tavení korozi-vzdorné oceli je 1510 °C. Rozdílná je také hustota obou materiálů. Pro titan je to 4505 kg/m<sup>3</sup> a pro ocel 7850 kg/m<sup>3</sup> [19, 24, 27 – 29].

Titan a ocel je vhodné spojovat hned několika metodami. Mezi používané metody lze zařadit např. metodu TIG, výbuchové svařování a třecí svařování. Metoda TIG dosahuje relativně uspokojivých mechanických vlastností svaru. Ve spojích ale dochází ke vzniku prasklin, které jsou způsobeny výskytem křehké intermetalické fáze [24]. Vznik této intermetalické fáze je zapříčiněn nedokonalou rozpustností železa v titanu [12]. Další nevýhodou je vícestupňový proces výroby spojů a potřeba použít mezivrstvy jako je např. tantalový nebo vanadový plech [24].

Svařování plazmou není zrovna ideální metodou pro spojování titanu a oceli. Materiál lze spojit, ale spoj nebude vysoké kvality. Působením plazmy, která dosahuje teplot okolo 16 000 °C dochází k vytváření přetavených oblastí, které obsahují křehké intermetalické fáze, které vznikají kvůli slabé rozpustnosti železa v titanu.

Použití laserového svařování pro spojení titanu s ocelí není příliš vhodné. Ve svarové oblasti bude vznikat křehká intermetalická fáze, která vzniká, jak již bylo zmíněno, neideální rozpustností železa v titanu [12].



Svařování výbuchem představuje nejspíše nejvhodnější metodu spojování titanu s ocelí. Metoda zajišťuje dosažení velmi dobrých mechanických a technologických vlastností spojů. Bylo zaznamenáno dosažení velmi vysokých pevnostních vlastností v oblasti svarového spoje. Velkou výhodou je možnost spojovat jak malé, tak velké rozměry materiálů. Další výhodou jsou nízké provozní náklady, krátké svařovací časy, základní materiál není tepelně ovlivněn a možnost svařovat materiály různých tlouštěk, kde základní materiál může mít libovolný rozměr tloušťky. Nevýhodou metody je potřeba použití speciálního prostředí, správná volba parametrů (výbušnina – detonační rychlost), hluchost a práce s nebezpečnými výbušninami [12, 13, 24].

### 3 Praktická část

Praktická část se zaměřuje na metalografický rozbor vzorku z plechu austenitické chromniklové korozivzdorné oceli 304 SS (označení podle SAE/AISI) 18/10, na kterou byl výbuchem navařen titan komerční čistoty (CP). Experiment byl proveden firmou EXPLOMET – Opole, která se specializuje právě na svařování výbuchem. Materiál byl po navaření tepelně zpracován. Byl proveden ohřev na teplotu 600 °C, následovala izotermická výdrž na této teplotě po dobu 1,5 h. a nakonec byl vzorek ochlazován na vzduchu. Tepelné zpracování bylo provedeno za účelem snížení pnutí po výbuchu a zrovnoměnění mikrostruktury titanu. Pokud by se zopakoval proces tohoto tepelného zpracování, došlo by k dalšímu snížení pnutí v materiálu a zrovnoměnění struktury. Mohlo by také dojít k ovlivnění, respektive k částečnému rozpuštění intermetalických fází vzniklých během výbuchu [17]. Druhé tepelné zpracování na vzorcích realizováno nebylo.

Základním materiálem pro experiment je plech chromniklové antikorozi ocel 18/10 o rozměrech 3 m x 3 m x 110 mm, na který byla výbuchem navařena 8 mm vrstva titanu. Následně byly odebrány vzorky, které byly dále vyhodnocovány. Rozměry odebraných vzorků mají parametry 10x10x16 mm, kde 16 mm výška materiálu zahrnuje 8 mm návar titanu komerční čistoty nad svarem a 8 mm návar oceli 18/10 pod svarem. Svar je přibližně uprostřed výšky vzorků. Vzorky byly v metalografické laboratoři vybroušeny, dále byly vyleštěny, a nakonec také naleptány. Byla realizována čistota materiálu, byla sledována mikrostruktura materiálů, stanovila se perioda a amplituda vln ve svarové oblasti, byla měřena tloušťka nakupeného materiálu u interfáze, byla stanovena mikrotvrdost materiálů v souvislosti se vzdáleností od svarového spoje a byly stanoveny podíly titanu a železa ve vlnách kolem intermetalických fází. Příslušné snímky vln a mikrostruktur byly pořízeny pomocí elektronového mikroskopu.

**Tabulka 7** Chemické složení oceli 18/10 a CP titanu použitých v praktické části [hm. %] [12]

CrNi 18/10 deska						
Mn	Cr	Ni	Si	P	S	C
1,9	18,4	9,8	0,46	0,006	0,011	0,04
Ti deska						
C	Fe	N	H	O	Ti	
0,01	0,05	0,005	0,006	0,05	zbytek	

Při přípravě a analýze vzorků byl použit elektronový mikroskop SEM JEOL JSM-6490 LV vybavený RTG analyzátozem EDA pro mikro fraktografický rozbor, chemické analýzy přítomných částic, respektive fází, RTG mapy. Pro stanovení obsahu nekovových vměstků bylo postupováno podle normy ČSN EN ISO 4967. Pro měření mikrotvrdosti se postupovalo dle

normy ČSN EN ISO 6507-1 a byl použit poloautomatický přístroj LECO 2000 vybavený programem na měření tvrdosti se zatížením od 0,1 g až do 1 kg.

### **3.1 Vybrané metalografické parametry výbuchem svařované oceli 18/10 s CP Ti**

#### **3.1.1 Příprava vzorků pro experimentální část**

Dodané vzorky o rozměrech 10x10x16 mm byly vybroušeny na brusném kotouči s použitím brusného papíru tak, aby byly minimalizovány nerovnosti a povrch byl hladký, při čemž dochází k úbytku materiálu. Během broušení se vzorek a brusný papír polévá vodou pro odstranění nečistot. Nejdříve byl použit brusný papír s větší drsností a poté jemnější papír. Při změně papírů na jemnější byl vzorek důkladně propláchnut vodou, aby byly odstraněny zachycené částice brusného papíru a nedošlo k znehodnocení broušené plochy. K broušení se používají brusné papíry na bázi SiC nebo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se zrnitostí od 60 do 2400 podle normy FEPA [30].

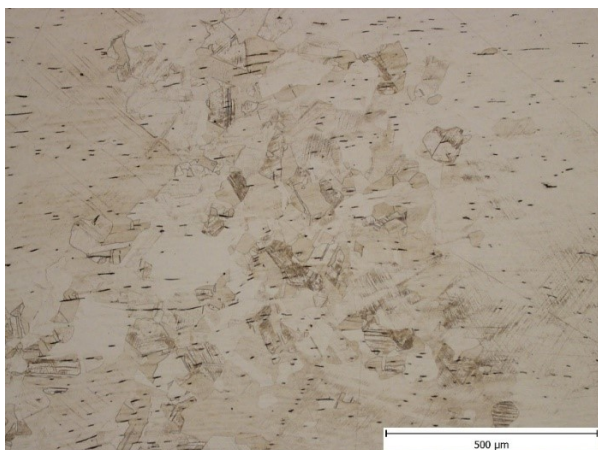
Pro kvalitní přípravu vzorků je třeba provést leštění. Během tohoto procesu nedochází k úbytku materiálu z povrchu broušené plochy a dochází k jeho vyhlazení [30]. Svařený bimetal titanu a oceli 18/10 byl mechanicky leštěn na leštícím kotouči s použitím směsi kaolinu [12].

Pro vyvolání mikrostruktury vzorků bylo provedeno leptání. Vzhledem k tomu, že se jedná o dva různé svařené materiály, bylo třeba pro každý z nich použít jiný druh leptadla. Pro titan byla použita směs KROLL (H<sub>2</sub>O + HNO<sub>3</sub> + HF) a pro antikorozi ocel byla použita směs H<sub>2</sub>O+HCl+HNO<sub>3</sub>.

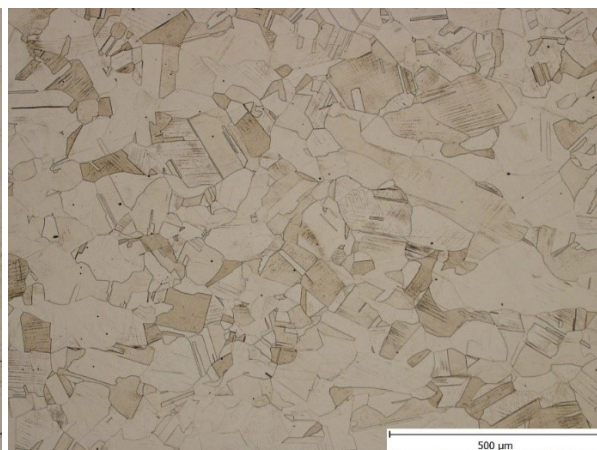
#### **3.1.2 Analýza mikrostruktury antikorozi oceli 18/10**

Základním materiálem je antikorozi ocel 18/10 (Obr. 17 a 18). Mikrostruktura vykazuje typickou austenitickou strukturu, která obsahuje deformační dvojčata. Ve struktuře se také vyskytuje zlomkové množství  $\delta$  feritu, který je na snímku struktury dobře viditelný v podobě tmavých protáhlých zrn – viz. Obr. 17.

Snímky byly pořizovány ve vzdálenosti 2 mm od svarového spoje (Obr. 17 a 18) a v oblasti svarového spoje (Obr. 19). Důvodem pořízení snímků ve dvou oblastech je porovnání velikosti zrn. Ze snímků je vidět, že zrna nacházející se blízko svarové oblasti jsou jemnější než zrna nacházející se dále od svarové oblasti.



Obr. 17 – Struktura oceli 18/10 2 mm od svaru



Obr. 18 – Struktura zrn oceli 18/10  
2 mm od svaru

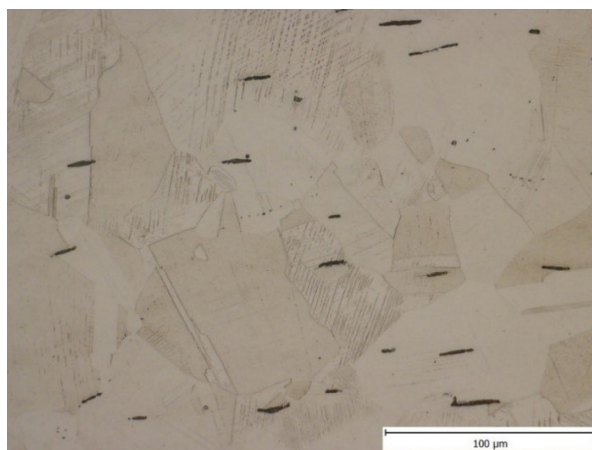


Obr. 19 – Struktura zrn oceli 18/10 v oblasti svarového spoje

Byla naměřena velikost zrn v blízkosti svarového spoje. Velikost zrn v blízkosti svarového spoje je velmi různá, ale zpravidla platí, že nejmenší zrna se vyskytují v oblasti, která je nejbližší svarovému spoji. Nejmenší naměřená velikost zrna se pohybovala na 14,1  $\mu\text{m}$  a největší zrna dosahovala hodnot až 60,5  $\mu\text{m}$ . Průměrná velikost zrn v této oblasti odpovídá 31,1  $\mu\text{m}$ . Se zvětšující se vzdáleností od svarového spoje je patrné zvětšení zrn. Zrna ve vzdálenosti 500  $\mu\text{m}$  dosahují průměrných hodnot okolo 73,6  $\mu\text{m}$ , kde nejmenší naměřená zrna měla velikost od 49,4  $\mu\text{m}$  a ta největší až 109,5  $\mu\text{m}$ .

Měření velikosti zrn bylo provedeno také na 2 mm od svarové oblasti. Nejmenší naměřená hodnota velikosti zrna byla 36,2  $\mu\text{m}$  a největší hodnota 173,1  $\mu\text{m}$ . Průměrná velikost zrn odpovídala 81,8  $\mu\text{m}$ . Velikosti zrn v této oblasti jsou velmi různé. Zásadním zjištěním však je, že velikost zrn v okolí svarového spoje je více než dvojnásobně menší než ve vzdálenosti 500  $\mu\text{m}$  od svarového spoje. To je zapříčiněno výbuchem, resp. Vysokou teplotou a zejména tlakem v oblasti spoje, což vede ke svaření obou svařovaných materiálů.

Mřížkovou metodou byl určen podíl  $\delta$  feritu ve struktuře antikorozi oceli 18/10. Průměrný podíl  $\delta$  feritu 2 mm od spoje, odpovídal na 4,7 %. V blízkosti svarového spoje se  $\delta$  ferit vyskytuje velmi omezeně. Obecně  $\delta$  ferit vzniká za vysokých teplot, při vysoké rychlosti ochlazování, při nevyvážené solidifikaci a také díky feritotvorným prvkům, které jsou součástí chemického složení a podporují zúžení oblasti stabilního austenitu. Vhodnější metodou pro stanovení obsahu  $\delta$  feritu by byla synchrotronová analýza [12]. Obr. 20 znázorňuje detail struktury antikorozi oceli 18/10 s dobře viditelným podílem  $\delta$  feritu.



Obr. 20 – Detail struktury antikorozi oceli 18/10

### 3.1.3 Analýza mikrostruktury komerčně čistého titanu

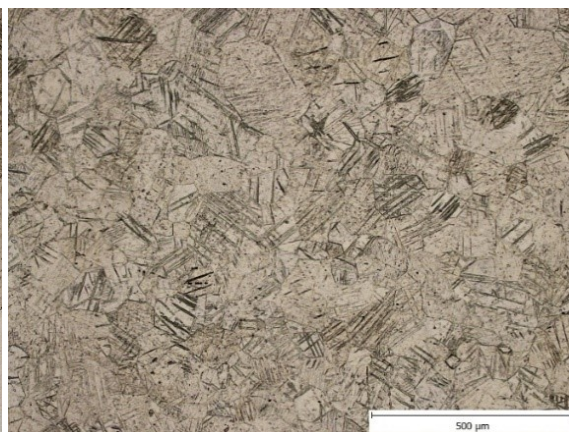
Obdobně jak tomu bylo u oceli, byla stanovena velikost zrn také u titanu. Titan se zde vyskytuje v  $\alpha$  modifikaci [12]. Nejdříve byla měřena velikost zrn titanu v oblasti svarového spoje, tedy v místě, kde je materiál nejvíce nahuštěn. Zrna v této oblasti jsou velmi malá. Nejmenší naměřená zrna se pohybovala na 3  $\mu\text{m}$ . Největší naměřená zrna dosahovala až 14,1  $\mu\text{m}$ . Průměrná hodnota velikosti zrn v této oblasti byla stanovena na 7,8  $\mu\text{m}$ .

Dále byla naměřena velikost zrn v oblasti 2 mm od svarového spoje. Zrna nacházející se v této oblasti byla podstatně větší, než tomu bylo v oblasti svarového spoje. Nejmenší naměřená zrna se pohybovala od hodnot 36,1  $\mu\text{m}$  a ta největší dosahovala až 157,2  $\mu\text{m}$ . Průměrná hodnota zrn v této oblasti pak odpovídala 78,2  $\mu\text{m}$ . Z naměřených hodnot lze usoudit, že nakupení materiálu v oblasti svarového spoje, spolu s dalšími vlivy jeho tvorby, má podstatný vliv na velikost zrn titanu. Obr. 21 znázorňuje strukturu zrn titanu v oblasti svarového spoje. Na Obr. 22 lze vidět strukturu zrn titanu v oblasti 2 mm od svaru. Detail struktury zrn titanu je znázorněn na Obr. 23.

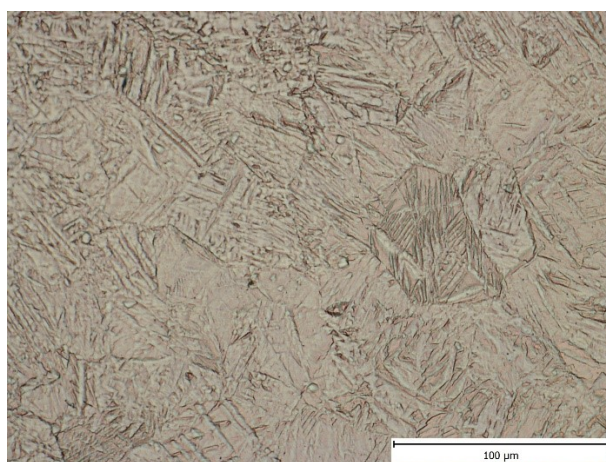




Obr. 21 – Struktura zrn titanu v oblasti svarového spoje



Obr. 22 – Struktura zrn titanu 2 mm od spoje



Obr. 23 – Detail struktury titanu

V Tabulce 8 jsou srovnány naměřené hodnoty velikosti zrn obou materiálů jak v blízkosti svarového spoje, tak ve vzdálenosti 2 mm od spoje. Ze srovnání vyplývá, že hodnoty velikosti zrn pro titan jsou v blízkosti svarové oblasti mnohem menší než hodnoty pro ocel. Hodnoty velikosti zrn oceli i titanu jsou si v oblasti 2 mm od spoje velice podobné. Vliv na velikost zrn v oblasti svarového spoje musel mít tlak a teplota vzniklé explozí důsledkem čeho došlo k nakupení materiálu a ke vzniku spoje. Vliv na velikost zrn mělo také tepelné zpracování.

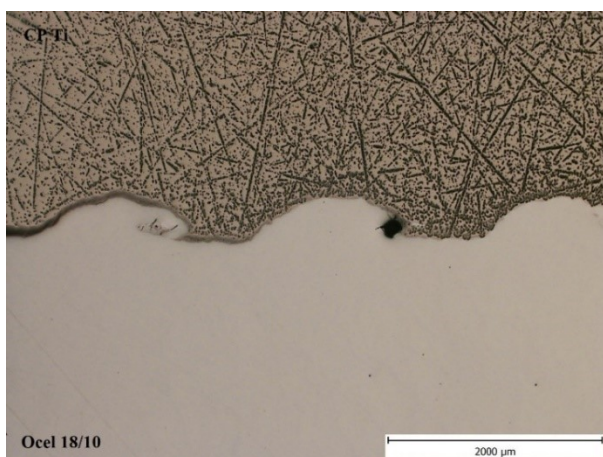
**Tabulka 8** Srovnání velikosti zrn antikoroční oceli 18/10 a CP titanu v různých oblastech

Materiál	Oblast svarového spoje [ $\mu\text{m}$ ]	Oblast 2 mm od spoje [ $\mu\text{m}$ ]
Antikorozní ocel 18/10	31,1	81,8
CP titan	7,8	78,2

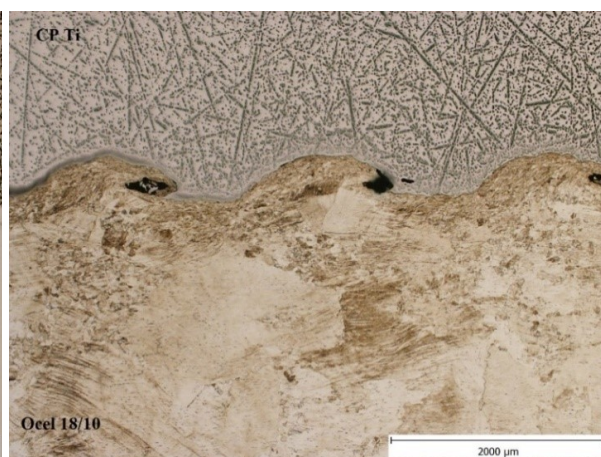
### 3.1.4 Měření tloušťky nakupeného materiálu u interfáze

Vlivem deformace způsobené explozí došlo k nakupení materiálu v blízkosti svarového spoje. V austenitické chromniklové oceli se deformační zóna poblíž svarového spoje vyznačuje vyšším obsahem deformačních dvojčat a charakteristická pro tuto oblast jsou také prodloužená zrna, která vznikla působením deformace [12]. V antikorozní oceli 18/10 byla na rozhraní zaznamenána souvislá vrstva nakupeného materiálu. Tato vrstva byla změřena a její průměrná tloušťka je 65  $\mu\text{m}$ . Minimální naměřená hodnota vrstvy je okolo 30  $\mu\text{m}$  a maximální tloušťka vrstvy dosahovala někdy hodnot až 100,7  $\mu\text{m}$ . U titanu, který je v tomto případě navařovaným materiálem, vždy dochází k větší deformaci nežli v základním materiálu, kterým je korozivzdorná ocel [12]. U titanu je vrstva nakupeného materiálu průměrně o tloušťce 67,8  $\mu\text{m}$ . V některých místech byla naměřena minimální tloušťka okolo 31,8  $\mu\text{m}$ . V jiných místech byla vrstva nakupení mnohem větší než obvykle a dosahovala hodnot až 80,3  $\mu\text{m}$ .

Vrstvy nakupeného materiálu jsou si v obou materiálech velmi podobné. U oceli byla vrstva rovnoměrnější a hodnoty se zpravidla tolik nelišily od průměrné hodnoty. U titanu byla tloušťka vrstvy méně rovnoměrná než u oceli. Výška vrstvy se u obou materiálů zpravidla zmenšovala v oblasti vrcholu vlny. Na Obr. 24 je znázorněna oblast svarového spoje CP titanu a oceli 18/10, kde je možno vidět oblasti nakupeného materiálu v blízkosti spoje. Charakteristické je zde zvlnění svarového spoje. Obr. 25 znázorňuje naleptanou strukturu svarového spoje CP titanu a oceli 18/10, kde lze pozorovat nahuštění materiálu.



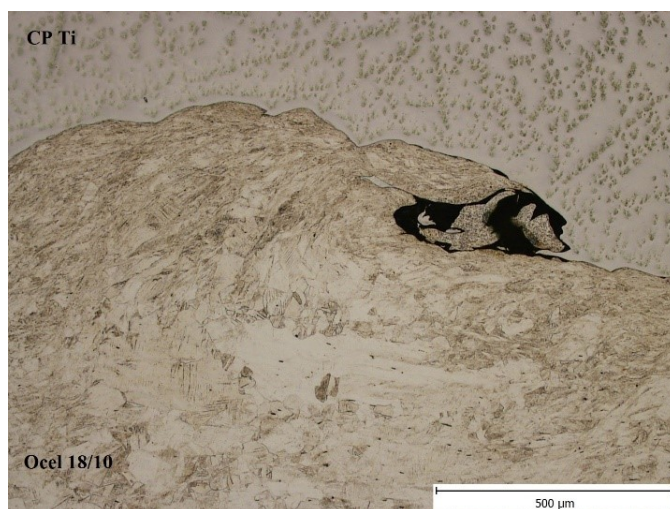
Obr. 24 – Svarový spoj CP titanu a oceli 18/10  
s charakteristickým zvlněním



Obr. 25 – Svarový spoj CP titanu  
a oceli 18/10, leptáno

### 3.1.5 Analýza vlny svarového spoje

Vznik vln na svarovém rozhraní je u výbuchového svařování způsoben tlakem navařovaného materiálu na základní materiál. Tlak je vytvořen explozí a za vysokých teplot při krátkém svařovacím čase dochází ke vzniku vlny, kolem které je nakupen materiál. V blízkosti vln velmi často dochází ke vzniku intermetalických fází, které jsou křehké a tudíž nežádoucí. Struktura je v blízkosti spoje deformována, což se projevuje nakupením materiálu [12]. Z naměřených hodnot vyplývá, že zrna jsou v oblasti spoje podstatně menší než ve zbytku struktury materiálu. Pro titan byla průměrná hodnota velikosti zrn v této oblasti 7,8  $\mu\text{m}$  a zrna oceli 18/10 byla podstatně větší, dosahovaly průměrných hodnot 31,1  $\mu\text{m}$ . Nahuštění materiálů bylo jak u titanu, tak i u oceli velmi podobné. U oceli byla výška nahuštěného materiálu v okolí vln 65  $\mu\text{m}$  a u titanu 67,8  $\mu\text{m}$ . Na Obr. 26 je znázorněn detail vlny svarového spoje titanu a oceli 18/10, kde je dobře viditelná nahuštěná oblast materiálu a interfáze obsahující intermetalické fáze.



Obr. 26 – Vlna svarového spoje CP titanu a oceli 18/10, leptáno

Vlny v oblasti svarového spoje jsou charakteristické pro výbuchové svařování. Tvorba a velikost může záviset od kinetické energie vzniklé během výbuchu, tlaku navařovaného materiálu na základní materiál a změny rychlostí v bodě kolize. Pokud se energie vzniklá během detonace neuvolní dostatečně rychle, vznikají na konci vln kudrlinky. Optimální podmínky při spojování zajišťují vznik pravidelných vln. Pravidelnost a symetrie vln jsou příznivými faktory pro kvalitu svarového spoje [31]. Následně byly měřeny parametry vln vzniklých ve svarovém spoji CP titanu a oceli 18/10. Průměrná délka vln dosáhla hodnoty 2037  $\mu\text{m}$  a amplituda vln dosahovala průměrné hodnoty 412  $\mu\text{m}$ . Rozdíly mezi vlnami nebyly značné, vlny jsou periodické a jejich rozměry amplitud i délek jsou si velmi podobné. Na Obr. 27-31 jsou zobrazeny různé pohledy na vlnu svarového spoje CP titanu a oceli 18/10.

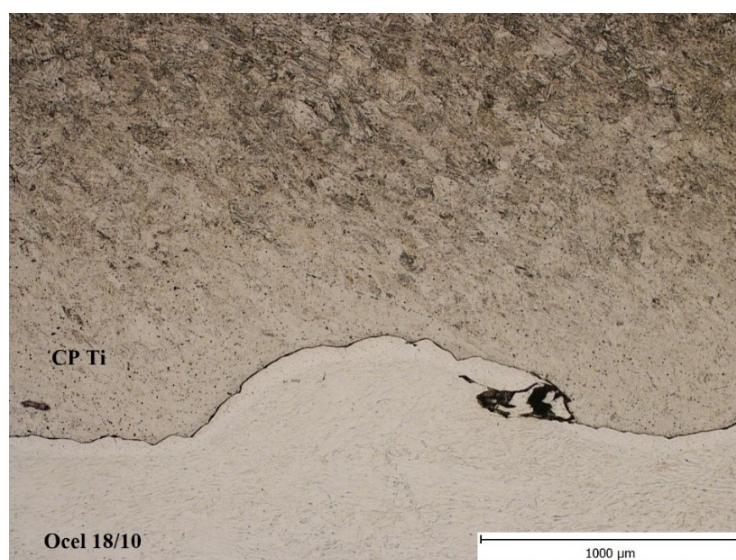




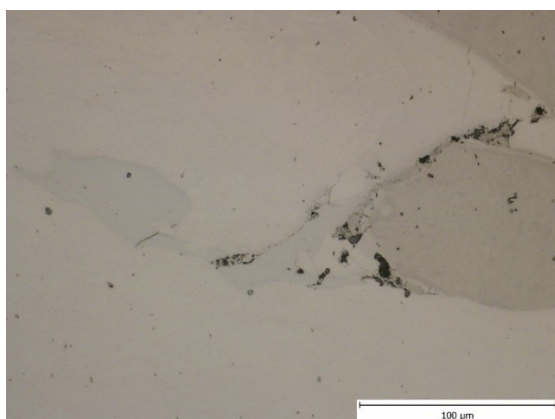
Obr. 27 – Detail struktury vlny svarového spoje



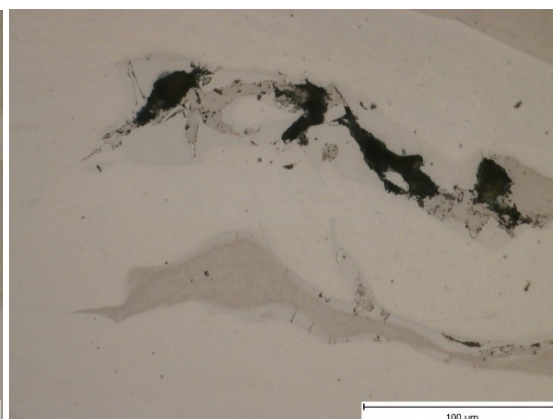
Obr. 28 – Vlna svarového spoje s nízkým podílem intermetalik



Obr. 29 – Vlna svarového spoje CP titanu a oceli 18/10



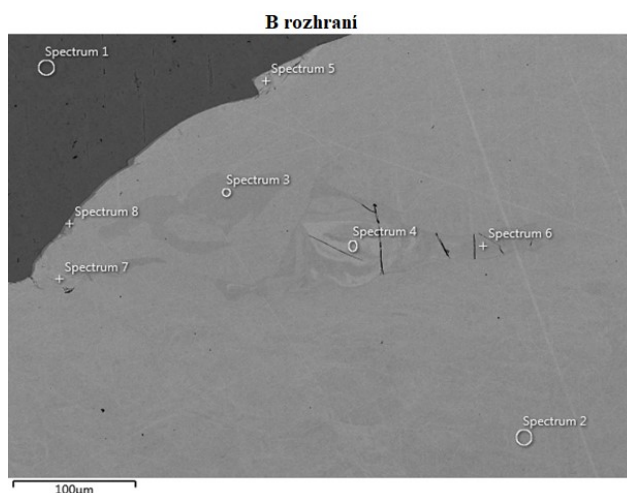
Obr. 30 – Vlna spoje s nižším podílem intermetalických fází



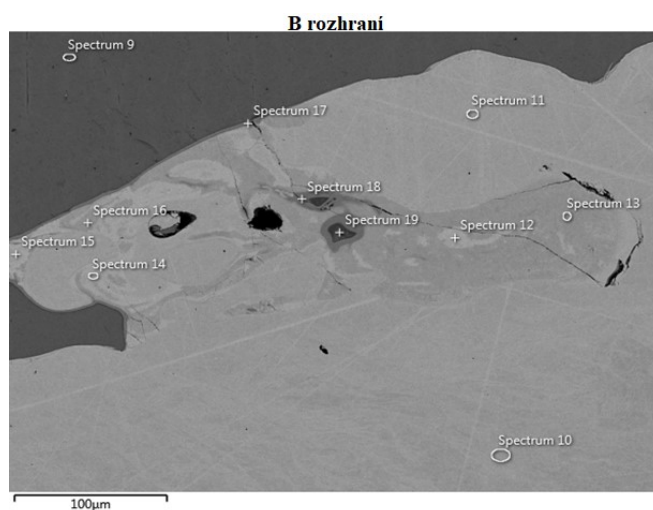
Obr. 31 – Vlna spoje s vysokým podílem intermetalických fází

### 3.1.6 Analýza fází pomocí SEM (řádovací elektronová mikroskopie)

Struktury materiálů a oblast svarového spoje byly dokumentovány pomocí SEM a byly vyhodnocovány obsahy prvků v jednotlivých oblastech svarového spoje. Použitým přístrojem byl řádkovací elektronový mikroskop SEM JEOL JSM-6490 LV vybavený RTG analyzátozem EDA pro mikro fraktografický rozbor, chemické analýzy přítomných částic. Pro stanovení obsahu nekovových vměstků byla použita norma ČSN EN ISO 4967. Analýza byla provedena ve dvou směrech – příčném a podélném. Snímky v příčném směru jsou označeny A, a snímky v podélném směru jsou označeny B. Hodnocení v podélného směru je vhodnější, jelikož zaznamenává vlny v oblasti spoje ve směru výbuchu, ale pro srovnání bylo provedeno také hodnocení v příčném směru. Nejdříve byla vyhodnocena data z podélného směru (B rozhraní). Na Obr. 32 a 33 jsou zobrazeny oblasti měření. Tabulka 9 shrnuje obsahy prvků v hmotnostních procentech a Tabulka 10 v atomárních procentech.



Obr. 32 – Označení pro analýzu v podélné oblasti (Spectrum 1-8)



Obr. 33 – Označení pro analýzu v podélné oblasti (Spectrum 9-19)

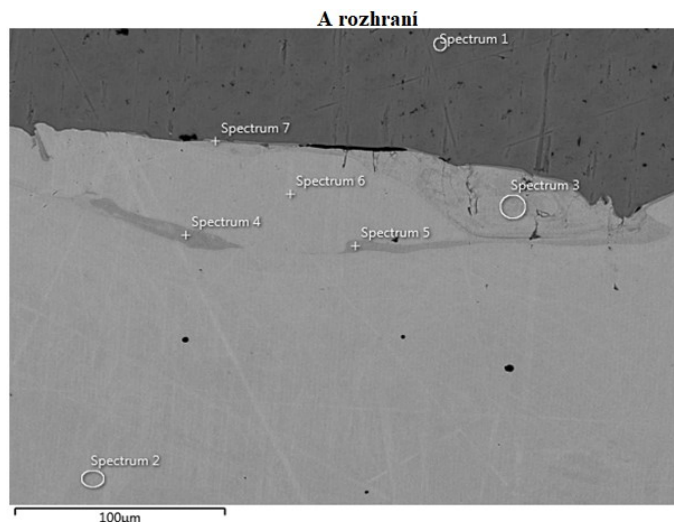
**Tabulka 9** Obsahy prvků v jednotlivých spektrech podélného směru [hm. %]

Spectrum Label	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
Spectrum 1	-	100,0	-	-	-	-
Spectrum 2	0,6	-	19,1	1,9	67,9	10,5
Spectrum 3	0,4	6,6	18,1	1,9	64,4	8,7
Spectrum 4	0,5	15,2	16,2	1,9	57,4	8,8
Spectrum 5	0,5	18,3	15,7	1,7	55,8	8,0
Spectrum 6	0,5	10,3	17,4	1,8	61,4	8,5
Spectrum 7	0,5	14,0	16,0	1,9	58,9	8,7
Spectrum 8	0,3	58,6	7,2	0,8	27,8	5,3
Spectrum 9	-	100,0	-	-	-	-
Spectrum 10	0,6	-	19,1	2,0	68,1	10,2
Spectrum 11	0,5	-	19,5	2,0	68,9	9,2
Spectrum 12	0,5	14,4	16,6	1,8	58,0	8,7
Spectrum 13	0,4	19,9	15,2	1,8	54,8	7,9
Spectrum 14	0,6	15,2	16,2	1,5	58,0	8,5
Spectrum 15	0,6	2,6	18,5	2,0	67,0	9,3
Spectrum 16	0,5	19,7	15,3	1,7	55,2	7,6
Spectrum 17	0,3	64,3	6,3	0,7	24,3	4,1
Spectrum 18	0,2	66,2	4,7	0,5	24,2	4,2
Spectrum 19	-	99,6	-	-	0,4	-

**Tabulka 10** Obsahy prvků v jednotlivých spektrech podélného směru [at. %]

Spectrum Label	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
Spectrum 1	-	100,0	-	-	-	-
Spectrum 2	1,2	-	20,2	1,9	66,9	9,8
Spectrum 3	0,8	7,5	19,0	1,9	62,8	8,0
Spectrum 4	1,0	17,1	16,8	1,8	55,3	8,1
Spectrum 5	1,0	20,5	16,2	1,6	53,5	7,3
Spectrum 6	1,0	11,6	18,1	1,8	59,6	7,9
Spectrum 7	1,0	15,7	16,6	1,8	56,9	8,0
Spectrum 8	0,5	61,9	7,0	0,8	25,2	4,6
Spectrum 9	-	100,0	-	-	-	-
Spectrum 10	1,2	-	20,2	2,0	67,0	9,6
Spectrum 11	1,0	-	20,6	2,0	67,9	8,6
Spectrum 12	1,0	16,2	17,2	1,7	55,9	8,0
Spectrum 13	0,8	22,2	15,7	1,7	52,4	7,2
Spectrum 14	1,1	17,1	16,8	1,5	55,9	7,7
Spectrum 15	1,2	3,0	19,5	2,0	65,7	8,7
Spectrum 16	1,0	22,0	15,7	1,6	52,7	6,9
Spectrum 17	0,5	67,4	6,1	0,7	21,9	3,5
Spectrum 18	0,4	69,3	4,5	0,5	21,7	3,6
Spectrum 19	-	99,7	-	-	0,3	-

Pozice hodnocení dat příčného směru (A rozhraní) zobrazuje Obr. 34. Tabulka 11 představuje obsahy prvků v hmotnostních % a Tabulka 12 v atomárních %.



Obr. 34 – Označení pro analýzu v příčné oblasti (Spectrum 1-7)

**Tabulka 11** Obsahy prvků v jednotlivých spektrech příčného směru [hm. %]

Spectrum Label	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
Spectrum 1	-	100,0	-	-	-	-
Spectrum 2	0,6	0,2	19,4	2,3	69,5	8,0
Spectrum 3	0,5	19,8	15,3	1,7	55,9	6,8
Spectrum 4	0,6	15,1	16,2	1,8	59,0	7,3
Spectrum 5	0,5	15,2	16,1	1,9	59,4	6,9
Spectrum 6	0,6	0,2	19,3	2,1	70,0	7,9
Spectrum 7	0,3	60,5	6,9	0,5	28,1	3,7

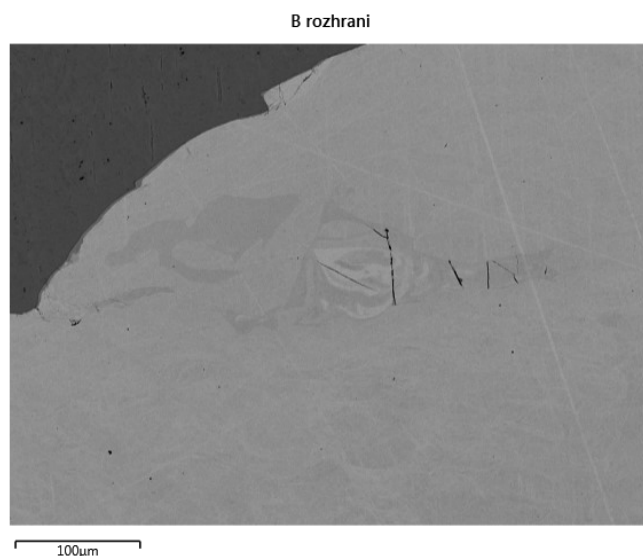
**Tabulka 12** Obsahy prvků v jednotlivých spektrech příčného směru [at. %]

Spectrum Label	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
Spectrum 1	-	100,0	-	-	-	-
Spectrum 2	1,2	0,2	20,5	2,3	68,4	7,5
Spectrum 3	1,0	22,1	15,7	1,6	53,4	6,2
Spectrum 4	1,1	17,0	16,8	1,7	56,8	6,7
Spectrum 5	1,0	17,1	16,7	1,8	57,1	6,3
Spectrum 6	1,2	0,2	20,3	2,1	68,9	7,4
Spectrum 7	0,6	63,8	6,7	0,5	25,3	3,2

Jak plyne z výsledků výše uvedených analýz, ve směsných oblastech kudrlin se vyskytuje minoritně čistý Ti, dále jsou zde oblasti s Ti okolo 60 až 66 hm. % a dále fáze vykazující zhruba 14 až 20 hm % Ti, což reprezentuje intermetalické fáze, které jsou možným zdrojem trhlin [12].

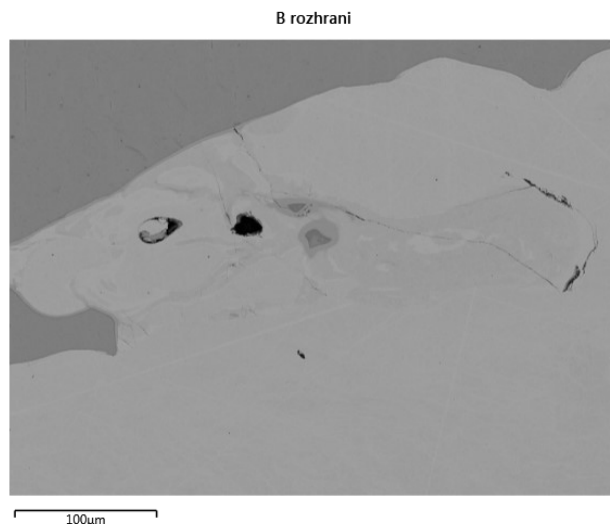
### 3.1.7 Vyhodnocování směsných oblastí pomocí SEM

V rámci zkoumání svarového spoje byly také pomocí SEM analyzovány, vedle směsných oblastí trhliny ve vlnách. Trhliny jsou nežádoucím jevem. Vyskytují se především v oblastech smíšených fází, kde lze detekovat křehké intermetalické fáze. Výskyt trhlín doprovází zhoršení mechanických vlastností, především plasticity u tahových zkoušek. Trhliny se u bimetalu, v tomto případě CP titanu a oceli 18/10, vyskytují zejména v oblasti spojů, kde se může hromadit vodík kolem intermetalických fází, které jsou efektivními vodíkovými pastmi v případě, že je materiál vystavený kyselému prostředí s vodíkem. Ve zmíněných oblastech je lokalizované napětí vyšší než v okolní matici, a to může mít dopad na vznik trhlín [12]. Obr. 35 zobrazuje pohled na vlnu svarového spoje pomocí SEM, kde jsou jasně patrné trhliny. Jedná se o snímek pořízený v podélném směru (B rozhraní).



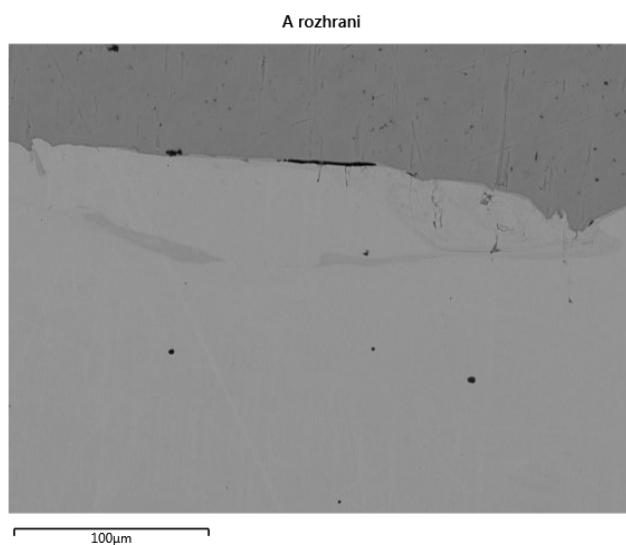
Obr. 35 – Trhliny ve směsné oblasti vlny svarového spoje v podélném směru (B1)

Trhliny se vyskytují ve směsné oblasti ve velmi těsné blízkosti interfáze, která zasahuje do oceli 18/10. Podle provedeného měření bylo zjištěno, že směsná oblast sahá na Obr. 34 do hloubky 249  $\mu\text{m}$ . Ve směsné oblasti na tomto obrázku se vyskytuje 8 trhlín, které se pohybují v rozmezí délek od 6,2  $\mu\text{m}$  do 63,5  $\mu\text{m}$ . Množství trhlín v jednotlivých vlnách se liší. Obecně lze konstatovat, že se ve směsných oblastech vyskytuje různé množství trhlín, které se pohybuje v rámci hodnocených vzorků v rozmezí od 8 do 12 trhlín na jednu vlnu. Rozměry jednotlivých trhlín jsou odlišné a pohybují se v rozmezí od 2,9  $\mu\text{m}$  do 157  $\mu\text{m}$ . Obr. 36 znázorňuje náhled na jinou vlnu se směsnou oblastí, ve které se vyskytuje více trhlín než na Obr. 35. Trhliny na tomto snímku mají menší tloušťku.



Obr. 36 – Trhliny ve směsné oblasti podélného směru (B2)

V příčném směru (A rozhraní), který je demonstrován na Obr. 37, se směsná oblast vyskytuje v menší hloubce, než je tomu ve směru podélném, což je dáno pozicí řezu. Směsná oblast dosahuje hloubky 87,9  $\mu\text{m}$ . Na snímku je zachyceno 11 trhlin, které jsou si rozměrově dosti podobné. Hodnoty trhlin se pohybují v rozsahu od 5,4  $\mu\text{m}$  do 24,5  $\mu\text{m}$ . Ve srovnání s podélným řezem, který zobrazuje celou vlnu svarového spoje, lze konstatovat, že větší význam pro analýzu trhlin a směsných oblastí mají snímky v podélném směru.

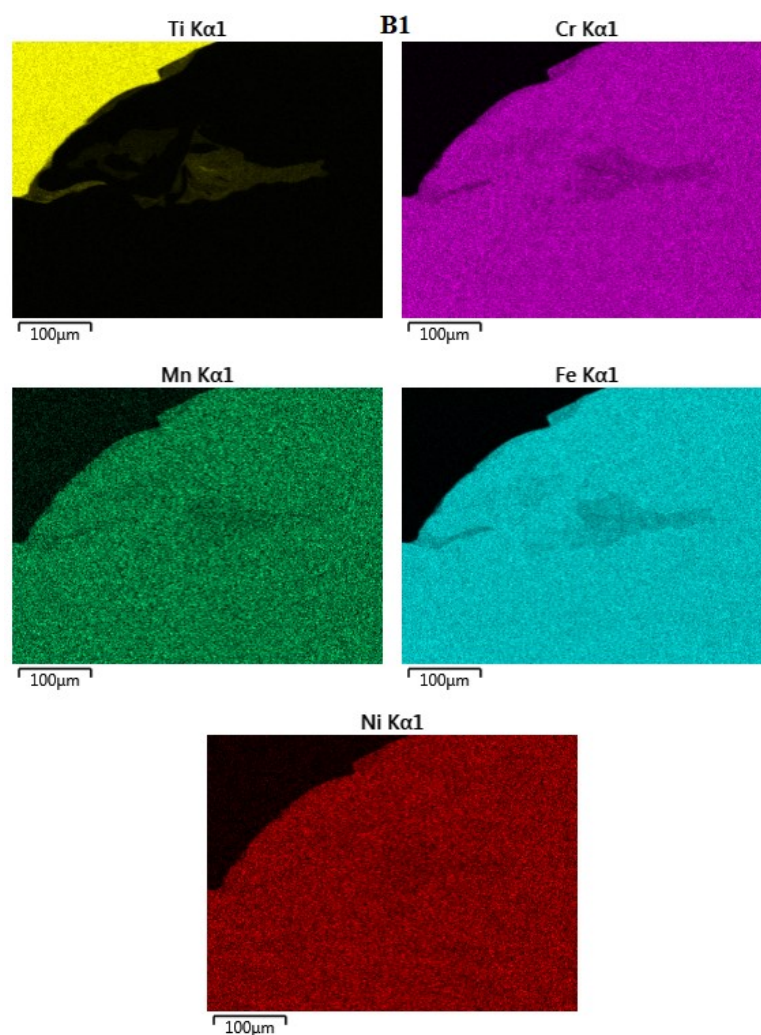


Obr. 37 – Směsná oblast a trhliny v příčném směru (A1)

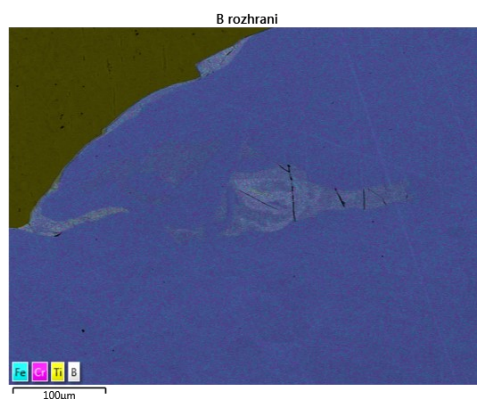
Vlivem neideálních podmínek pro spojování mohou v oblasti vln vznikat intermetalické fáze na bázi Fe a Ti, které jsou nežádoucí. Tyto intermetalické fáze vznikají zpravidla ve směsných oblastech (kudrlinách). Částečně je lze rozpustit použitím vhodného tepelného zpracování, jak bylo i popsáno v práci [7].



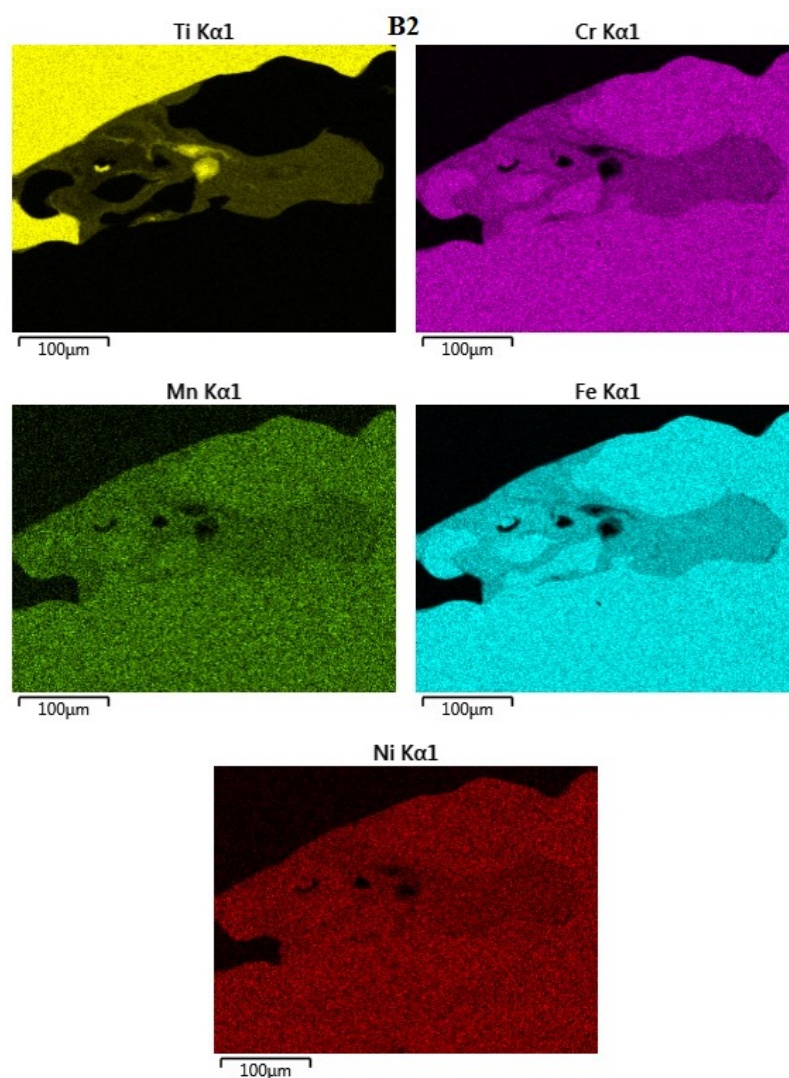
Pomocí SEM byla na rozhraních B1 (Obr. 35), B2 (Obr. 36) a A1 (Obr. 37) provedena analýza přítomných prvků v oblasti svaru (mapping), tj. zejména ve směsných oblastech. Na Obr. 38-43 jsou postupně zobrazeny jednotlivé mapy, které zobrazují výskyt prvků (Ti, Cr, Mn, Fe a Ni) na rozhraní svarového spoje.



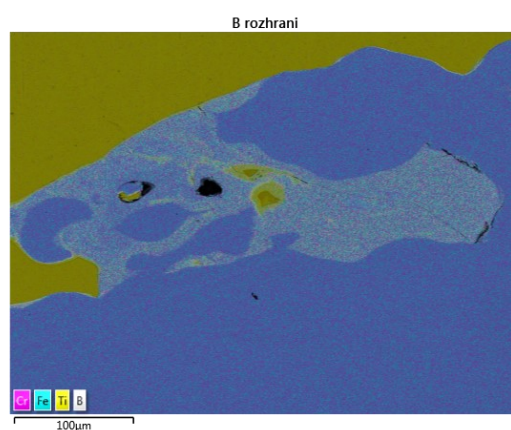
Obr. 38 – Mapy výskytu jednotlivých prvků v oblasti spoje rozhraní B1



Obr. 39 – Mapa výskytu prvků v oblasti spoje rozhraní B1

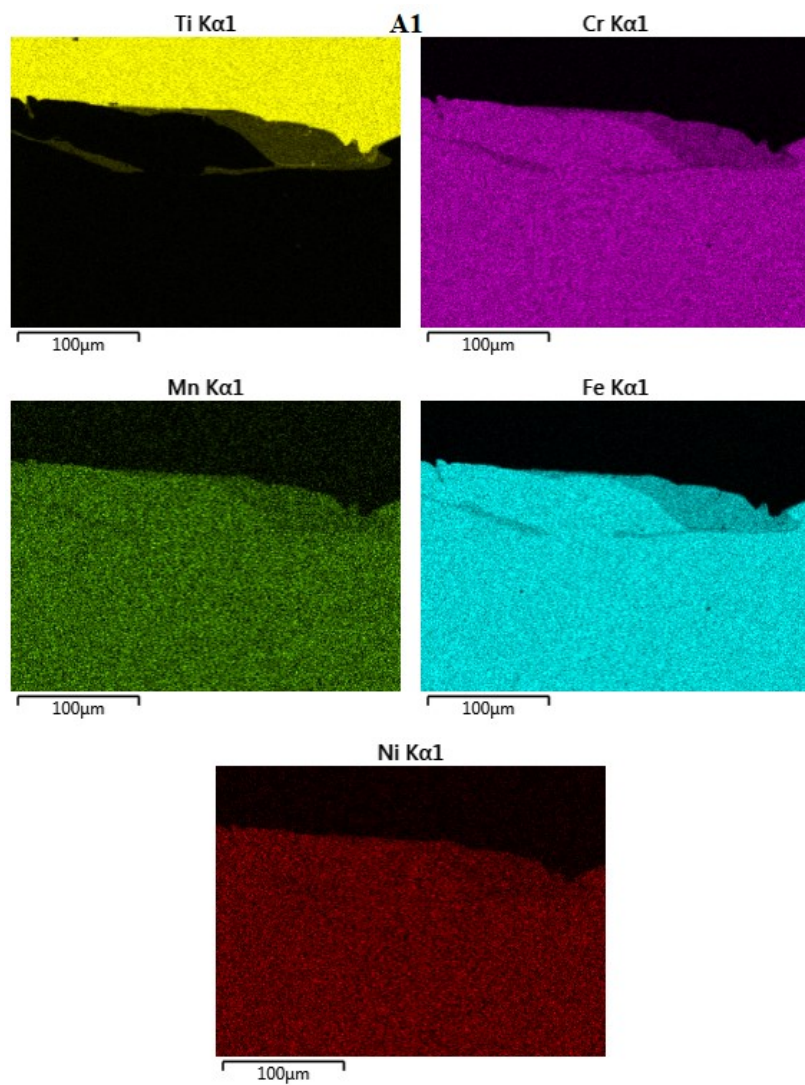


Obr. 40 – Mapy výskytu jednotlivých prvků v oblasti spoje rozhraní B2

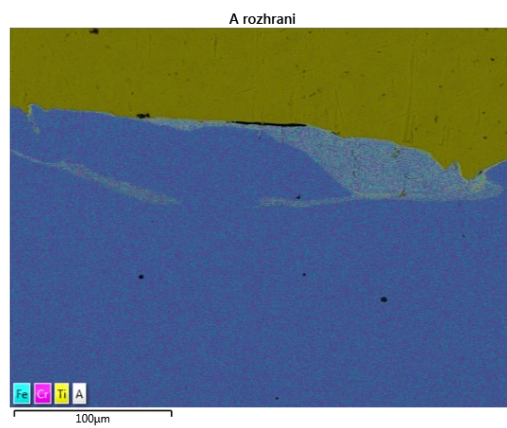


Obr. 41 – Mapa výskytu prvků v oblasti spoje rozhraní B2





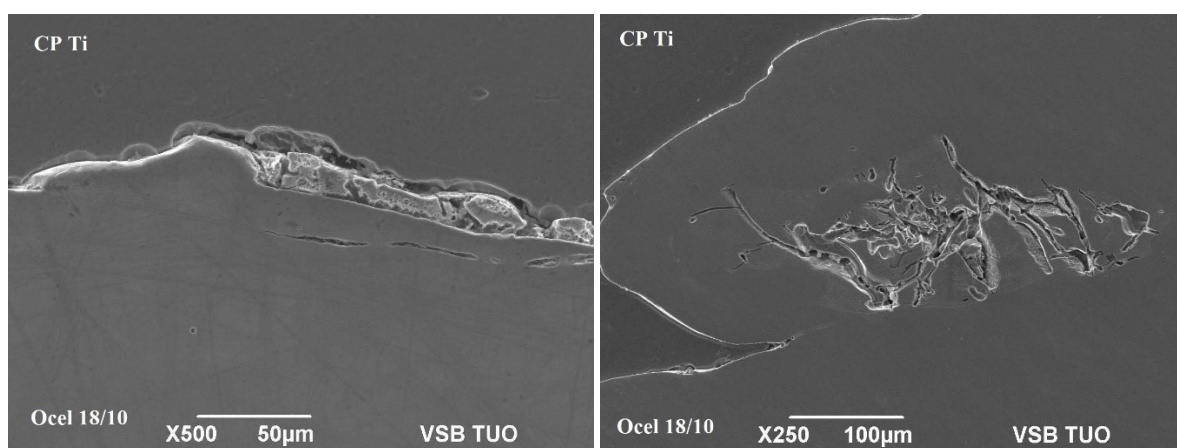
Obr. 42 – Mapy výskytu jednotlivých prvků v oblasti spoje rozhraní A1



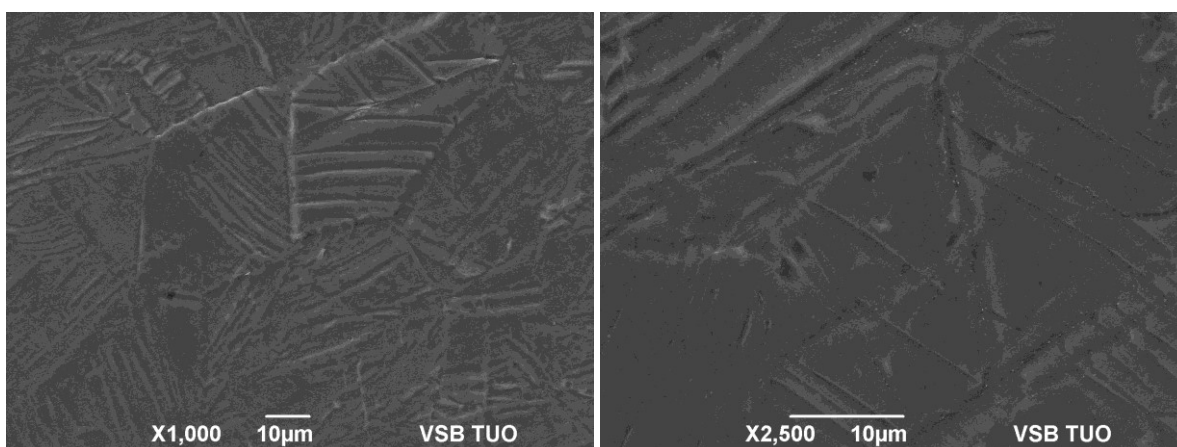
Obr. 43 – Mapa výskytu prvků v oblasti spoje rozhraní A1

Na snímcích výše je dobře patrné, jak navařovaný materiál (CP Ti) proniká do základního materiálu (antikorozi ocel 18/10). Ve směsných oblastech je jasně patrný výskyt titanu. V těchto oblastech vznikají také nežádoucí intermetalické fáze právě na bázi Fe a Ti, které jsou zodpovědné za vzniky trhlin. Oblasti s obsahem titanu okolo 60 at. % odpovídají intermetalickým fázím  $\text{FeTi}_2$ . Vyskytují se především na rozhraní směsné oblasti oceli 18/10 a jsou zodpovědné za vznik trhlin.

Pomocí SEI (sekundárních elektronů) byly pořízeny snímky směsných oblastí, v nichž se vyskytují intermetalické fáze, jak je ukázáno na Obr. 44, který zobrazuje odleptané rozhraní v podélném směru (B rozhraní) a Obr. 45, který zobrazuje odleptané rozhraní v příčném směru (A rozhraní). Obr. 46 a 47 znázorňují detailní snímek struktury titanu mimo oblast svaru vytvořený pomocí SEI.



Obr. 44 – SEI snímek odleptaného A rozhraní Obr. 45 – SEI snímek odleptaného B rozhraní



Obr. 46 – Struktura titanu

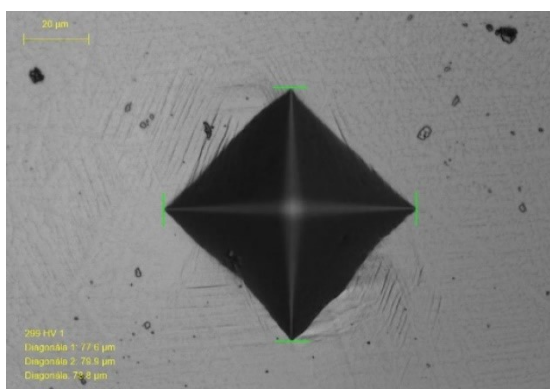
Obr. 47 – Detailnější záběr na strukturu titanu

### 3.1.8 Měření mikrotvrdosti podle Vickerse

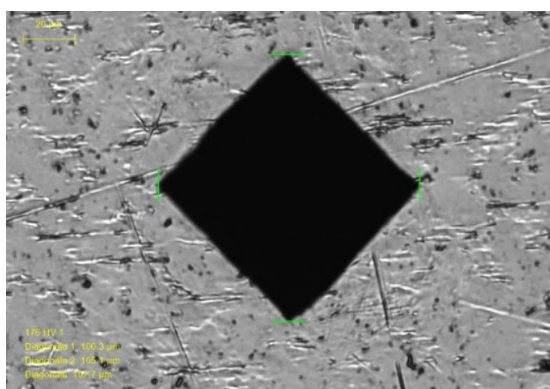
V rámci experimentu bylo provedeno měření mikrotvrdosti metodou podle Vickerse. Mikrotvrdost byla měřena v základním materiálu (ocel 18/10), v navařovaném materiálu a také v oblasti svarového spoje, aby se zjistilo, jak výbuch a následný vznik spoje ovlivnil oba materiály z hlediska mikrotvrdosti. Pro měření tvrdosti byl použit poloautomatický přístroj LECO 2000 vybavený programem na měření mikrotvrdosti se zatížením 0,1 g až 1 kg. Během měření bylo postupováno podle normy ČSN EN ISO 6507-1. V experimentu bylo pracováno se zatížením HV1, což představuje zkoušku tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení. Symbol zatížení HV1 představuje zatížení 1 kg, což se rovná zátěžné síle 10 N [32].

V rámci vyhodnocení je uváděn vzorek A, a vzorek B. Obr. 48 zobrazuje vpich do základního materiálu a Obr. 49 představuje vpich do navařovaného materiálu.

#### Vzorek A

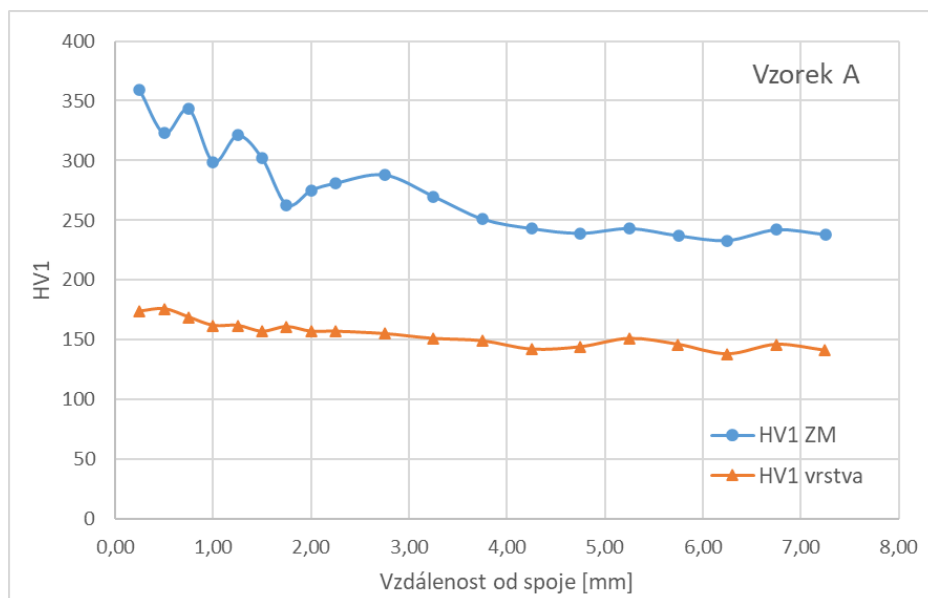


Obr. 48 – Vpich do oceli 18/10



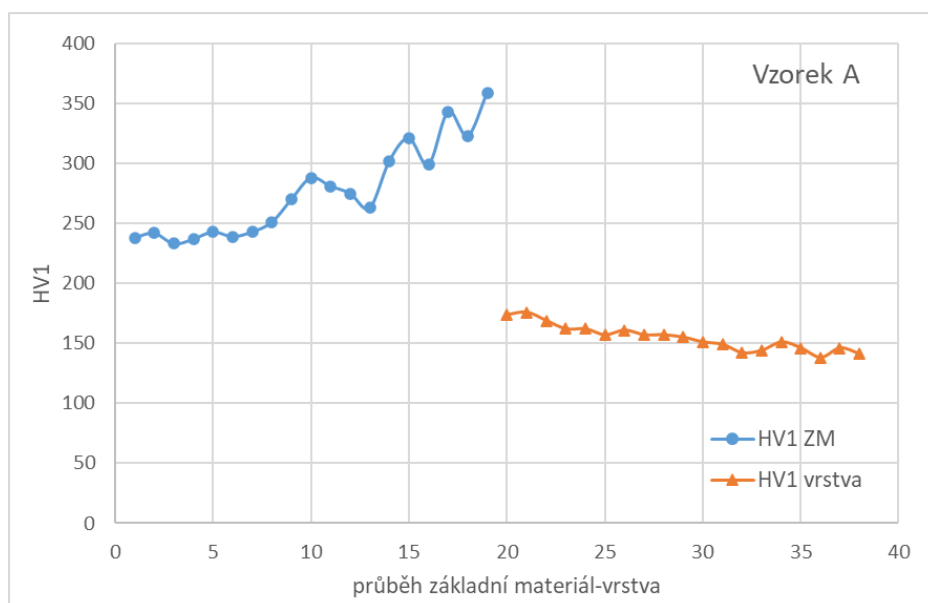
Obr. 49 – Vpich do CP titanu

Obr. 50 a 51 znázorňují průběh tvrdosti ve vzorku A podle Vickerse. Obr. 49 znázorňuje průběh měření základního materiálu a navařované vrstvy. Na Obr. 50 je zaznamenán průběh tvrdosti v základním materiálu až do navařované vrstvy.



Obr. 50 – Závislost tvrdosti na vzdálenosti od spoje

Nejvyšší zaznamenaná tvrdost oceli 18/10 dosahuje hodnoty HV1 359 v blízkosti 0,25 mm od svarového spoje. Nejvyšší zaznamenaná hodnota mikrotvrdosti pro CP titan dosahuje hodnoty HV1 176. Z průběhu grafu lze vidět, že mikrotvrdost základního materiálu v oblasti svarového spoje je mnohem více ovlivněna než u navařovaného materiálu, a to díky směsným oblastem, v nichž se nacházejí intermetalické fáze [7].

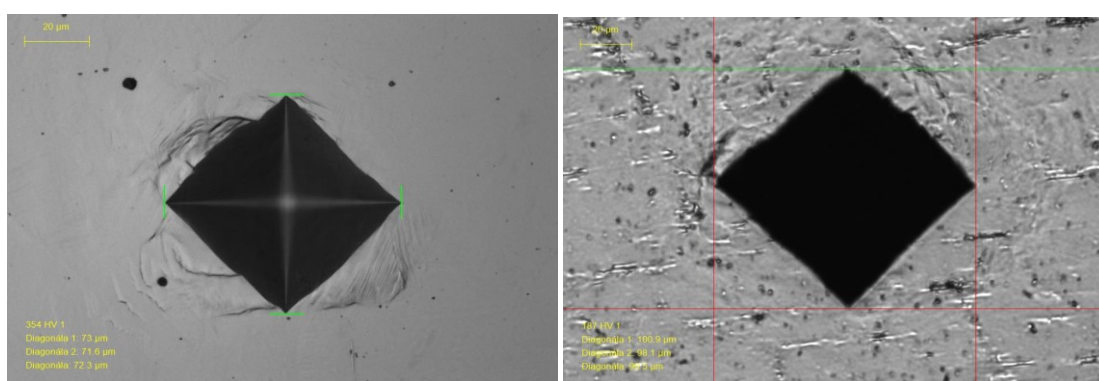


Obr. 51 – Závislost tvrdosti na vzdálenosti od svarového spoje pro oba materiály – uprostřed je situace z oblasti svaru

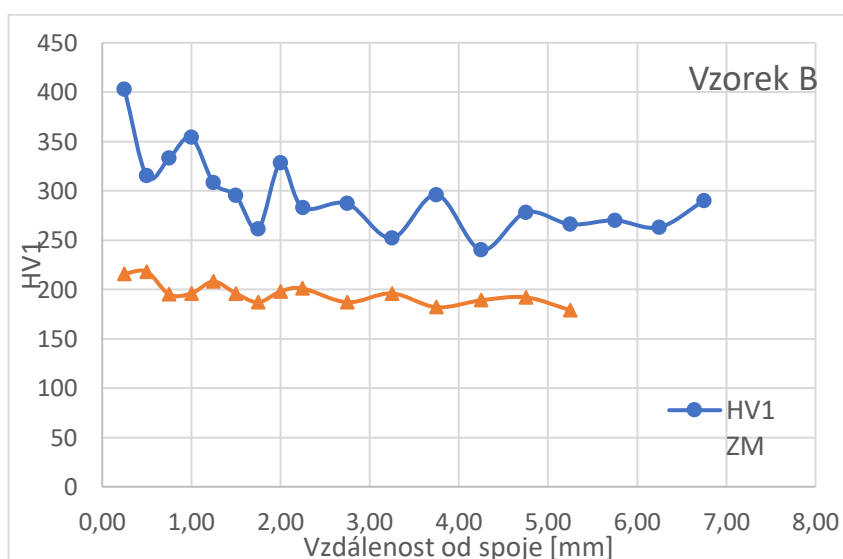
Z průběhu tvrdosti na Obr. 50 lze vyčíst, že základní materiál v blízkosti svarového spoje vykazuje značně vyšší hodnoty mikrotvrdosti. Mikrotvrdost navařovaného materiálu v oblasti svarového spoje vykazuje pouze velmi mírný nárůst.

## Vzorek B

Na Obr. 52 a 53 jsou znázorněny vpichy do základního a navařovaného materiálu. Obr. 54 a 55 znázorňují průběh mikrotvrdosti vzorku B podle Vickerse. Obr. 54 znázorňuje průběh měření v základním materiálu a navařované vrstvě. Na Obr. 55 je zaznamenán průběh měření v základním materiálu až do navařované vrstvy. Obr. 56 znázorňuje vpichy do vzorku pro zkoušku mikrotvrdosti.



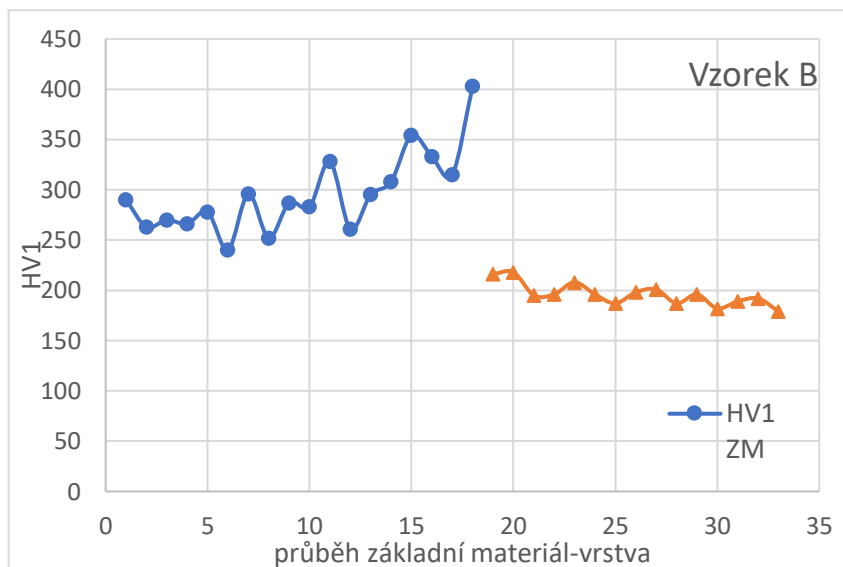
Obr. 52 – Vpich do základního materiálu    Obr. 53 – Vpich do navařovaného materiálu



Obr. 54 – Průběh mikrotvrdosti dle Vickerse u vzorku A – pro základní a navařený materiál

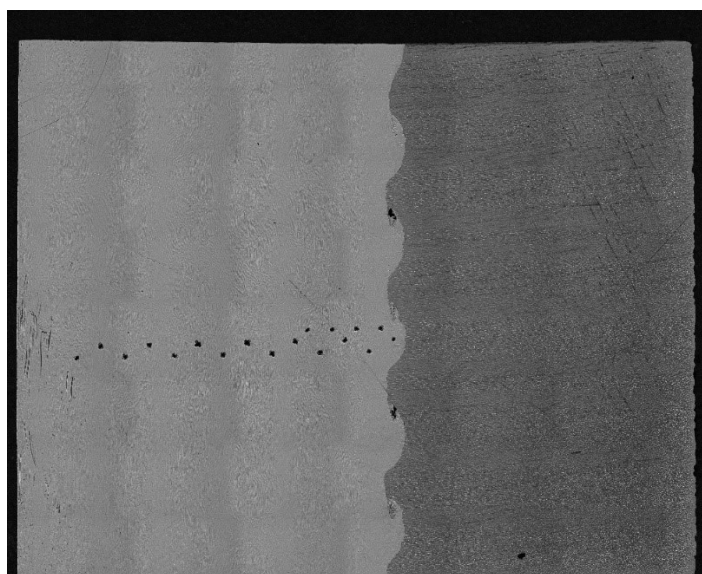


Nejvyšší zaznamenaná tvrdost oceli 18/10 podle Vickerse dosahuje hodnoty HV1 403. U CP titanu byla zjištěna nejvyšší hodnota tvrdosti HV1 218. Obdobně jak tomu bylo u vzorku A platí, že hodnoty mikrotvrdosti základního materiálu jsou v oblasti svarového spoje ovlivněny mnohem více než hodnoty mikrotvrdosti navařovaného materiálu.



Obr. 55 – Průběh mikrotvrdosti dle Vickerse u vzorku B pro základní a navařený materiál

V grafu na Obr. 55 lze pozorovat nárůst mikrotvrdosti základního materiálu v těsné blízkosti svarového spoje. Mikrotvrdost navařovaného materiálu je v této oblasti ovlivněna podstatně méně. Výsledky vzorku B souhlasí s výsledky vzorku A. Na Obr. 56 jsou znázorněny oblasti vpichů pro měření tvrdosti ve vzorku B.



Obr. 56 – Vpichy ve vzorku B pro měření mikrotvrdosti podle Vickerse

## 4 Závěr

Teoretická část bakalářské práce se zabývá nekonvenčními metodami svařování, konkrétně svařováním laserem, svařováním plazmou a svařováním výbuchem. U zmíněných metod byly popsány principy, na jakých fungují, dále fyzikální parametry svařování, svařitelnost materiálů těmito metodami a jejich aplikace. Zvýšená pozornost byla orientována na ocel typu 18/10 navařenou CP Ti pomocí výbuchu. Materiály svařované výbuchem se vyznačují zvlněným svarovým spojem, úzkou tepelně ovlivněnou oblastí, vysokou kvalitou spoje, včetně vyšších parametrů mechanických vlastností. I přes některé problémy svařování výbuchem, do kterých lze zařadit hluk při výbuchu nebo potřebu speciálního prostředí, představuje tato metoda velký potenciál spojování materiálů konvenčně nesvařitelných.

Praktická část práce se zabývala metalografickou analýzou výbuchem svařované antikorozi oceli 18/10 s CP titanem. Pozornost byla věnována velikostem zrn, která vykazovala značné rozdíly mezi velikostí zrn v oblasti svarového spoje a v oblasti 2 mm od svarového spoje. Daný rozdíl činil cca 60 % pro ocel a cca 90 % pro titan. Zrna v oblasti spoje byla u obou materiálů značně menší než v oblasti vzdálené od spoje, a to cca o 50  $\mu\text{m}$  u oceli a 70  $\mu\text{m}$  u titanu. V oblasti spoje bylo také pozorováno výrazné nahuštění materiálu. Dále byly měřeny délky a amplitudy vln svarového spoje, které vykazovaly minimální rozdíly a jejich geometrické vlastnosti si byly velmi podobné. Pomocí SEM byly mapovány fáze v oblasti svarového spoje a byly studovány trhliny detekované ve směsných oblastech. Bylo prokázáno, že vzniklé intermetalické fáze ve směsných oblastech jsou na bázi Fe a Ti a jsou zde zodpovědné za vznik trhlín. Měření mikrotvrdomosti podle Vickerse v oblasti základního materiálu, svarového spoje a navařovaného materiálu ukázalo vyšší hodnoty mikrotvrdomosti u oceli 18/10 v oblasti svarového spoje, což je zapříčiněno nahuštěnou oblastí jmenovaného materiálu a titanem, který vnikl do matrice oceli vlivem deformace při výbuchu. Hodnoty mikrotvrdomosti navařovaného materiálu v oblasti svarového spoje, i přes nahuštění materiálu, byly navýšeny jen mírně.

## Literatura

- [1] MAZANCOVÁ, Eva. *Moderní metody tepelného zpracování*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2013. Dostupné z: <https://www.fmfi.vsb.cz/cs/katedry-a-pracoviste/636/vyukove-opory-katedry/index.html>
- [2] KOŘÁN, Pavel. *Lasery a optika: Laserové svařování I* [online]. In: . 18.2.2013 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- [3] KUBNÝ, Jan. *Laserové svařování teplotních čidel* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/136818>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [4] ŠMÍRA, Pavel. *Moderní metody svařování aplikované v ČR* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/88307>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [5] KOŘÁN, Pavel. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 7. října 2009 [cit. 2021-03-28]. Poslední trendy ve svařování laserem. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/posledni-trendy-ve-svarovani-laserem>>.
- [6] SCHMIEDT, Lukáš. *Plazma* [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/?p=0>
- [7] NOGOL, Petr. *Plazmové svařování výfuků motorů* [online]. Brno, 2010 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/26000361-Plazmove-svarovani-vyfuku-motoru.html>. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [8] KOLÁŘÍK, Jaroslav. *Automatizace výrobních procesů svařování* [online]. Praha 6 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/4/05-AVP-svarovani.pdf>. ČVUT Praha.
- [9] ŠKŇOUŘILOVÁ, Eva. *Svařování plazmou vysokopevnostních ocelí* [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=41809](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41809). Diplomová práce. VUT Brno.



- [10] GOLĄŃSKI, Dariusz, Tomasz CHMIELEWSKI, Beata SKOWROŃSKA a Damian ROCHAŁSKI. *Advanced Applications of Microplasma Welding* [online]. 2018, , 11 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Tomasz-Chmielewski-6/publication/329713075\\_Advanced\\_Applications\\_of\\_Microplasma\\_Welding/links/5f3834daa6fdcccc43cc49ce/Advanced-Applications-of-Microplasma-Welding.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Tomasz-Chmielewski-6/publication/329713075_Advanced_Applications_of_Microplasma_Welding/links/5f3834daa6fdcccc43cc49ce/Advanced-Applications-of-Microplasma-Welding.pdf)
- [11] *Plasma arc welded Ti-6Al-4V sheet – bead-on plate* [online]. In: . 2014 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Plasma-arc-welded-Ti-6Al-4V-sheet-bead-on-plate\\_fig1\\_271134367](https://www.researchgate.net/figure/Plasma-arc-welded-Ti-6Al-4V-sheet-bead-on-plate_fig1_271134367)
- [12] OSTROUSHKO, Dmytro. *Vlastnosti materiálu Cr/Ni oceli spojeného s titanem výbuchem*. Ostrava, 2014. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava.
- [13] HRONČOK, Radek. *Vybrané mechanické vlastnosti výbuchem svařovaných materiálů*. Ostrava, 2014. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava.
- [14] BLAZYŃSKI, T. Z. *Explosive welding, forming and compaction* [online]. England [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-94-011-9751-9.pdf>
- [15] MOLNÁR, J., L. CHLÁDEK a M. TURŇA. *Nové postupy svařování a povrchových úprav: Kvalita, spolehlivost bimetalu Hadfieldova ocel' - konstrukční uhlíková ocel' vyhotoveného zváraním explóziou* [online]. Plzeň, 1992 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/24/063/24063244.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/063/24063244.pdf?r=1&r=1)
- [16] BALGA, D., D. OSTROUSHKO, E. MAZANCOVÁ a O. MILKOVIČ. Structure and mechanical properties of explosive welded Mg/Al bimetal. *Archives of metallurgy and materials* [online]. 2013, , 5 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/106443/55.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [17] SAKSL, K., D. OSTROUSHKO, E. MAZANCOVÁ a O. MILKOVIČ. Phase analysis of explosive welded Ti-Cr/Ni Steel in as-received state and after heat treatment using synchrotron. *Archives of metallurgy and materials* [online]. 2013, , 4 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/273506071\\_Phase\\_Analysis\\_of\\_Explosive\\_Welded\\_Ti-CrNi\\_Steel\\_in\\_As-Received\\_State\\_and\\_after\\_Heat\\_Treatment\\_Using\\_Synchrotron\\_Analiza\\_Fazowa\\_Polaczeni\\_a\\_Ti-CrStali\\_Ni\\_Wytworzonego\\_Metoda\\_Zgrzewania\\_Wybuchowego\\_W\\_St](https://www.researchgate.net/publication/273506071_Phase_Analysis_of_Explosive_Welded_Ti-CrNi_Steel_in_As-Received_State_and_after_Heat_Treatment_Using_Synchrotron_Analiza_Fazowa_Polaczeni_a_Ti-CrStali_Ni_Wytworzonego_Metoda_Zgrzewania_Wybuchowego_W_St)

- [18] COWAN, G.R., O.B. BERGMANN a A.H. HOLZMAN. Mechanism of bond zone wave formation in explosion clad metals. *Metallurgical Transactions*, vol. 2 [online]. 1971 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/BF02814967>
- [19] LOSERTOVÁ, Monika. *Slitiny neželezných kovů v moderním průmyslu*. Ostrava, 2017. Studijní opora. VŠB-TUO.
- [20] LKALLOY. *What's CP titanium?* [online]. China, 2018 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/whats-cp-titanium/>
- [21] ADÁMEK, Jakub. *EBSD analýza mikrostruktury CP-Ti-4 pro dentální implantáty* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/136520>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [22] *Svařování titanu* [online]. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://wolften.pl/cs/svarovani-titanu/>
- [23] *4 běžně používané metody svařování pro slitinu titanu* [online]. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/4-commonly-used-welding-methods-for-titanium-alloy/>
- [24] SZYMLEK, K. *Review of Titanium and Steel Welding Methods* [online]. Gdaňsk, 2008 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://search.proquest.com/openview/95e1f877ea13934852705ed0fd6fc56e/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2016339>
- [25] *Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace o použití, zpracování, svařování a možné korozi: Austenitické antikorozi oceli* [online]. 2020 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-1>
- [26] CUNAT, Pierre-Jean. *Svařování korozivzdorných ocelí* [online]. 2007, , 39 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/BrochureWeldability\\_CZ.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf)
- [27] *Bod tání kovů* [online]. 2015 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://eprehledy.cz/bod-tani-teplota-tani-kovu.php>
- [28] *Problémy při svařování, svařitelnost různých materiálů* [online]. 2021 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/kniha/problemy-pri-svarovani-svaritelnost-ruznych-materialu>

[29] BUREŠ, Jiří. *Hustota pevných látek* [online]. 2002 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>

[30] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. , 20 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>

[31] DRAGOBETSKII, Volodymir a Aleksandr SHAPOVAL. *Nowe techniki wybuchowego odkształcania i platerowania oraz ich zastosowania* [online]. 2016, , 12 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-450b1c54-8893-4afe-b4f2-42a707b046eb>

[32] DOLEŽAL, Pavel a Bohumil PACAL. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů* [online]. Brno [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/149104/Mikrotrvdost.pdf?seque>. VUT Brno.